

MASTER EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Mention : BIODIVERSITÉ TROPICALE

Spécialité : Écosystèmes naturels et exploités

***Evaluation de la fixation symbiotique de l'azote de
différentes légumineuses en interaction avec la
disponibilité en azote minéral du sol***

Richard TOUSSAINT



Pueraria phaseoloides en bananeraie

Directeur (s) de stage : Raphaël Achard

*Stage effectué au CIRAD (PRAM) Habitation Petit Morne 97232 Le Lamentin
Mémoire soutenu le : 28 juin 2010*

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce stage. Tout d'abord Raphaël Achard mon maître de stage pour m'avoir accueilli au sein de cet organisme. Il a été disponible, dynamique et de bon conseil lors de la relecture de mon rapport.

Je remercie également Philippe Tixier et l'ensemble des V.C.A.T.

Ma gratitude va aussi envers Nelly et Eliane du laboratoire. Sans leur aide, mon stage se serait terminé avec au moins deux mois de retard.

Je remercie, enfin, l'ensemble du personnel du P.R.A.M dont l'accueil a été très chaleureux.

Sommaire

I. Introduction.....	p.1
II. Bibliographie et problématique.....	p.2
A. Synthèse bibliographique	p.2
1. Fonctionnement azoté d'une bananeraie	p.2
a. Le bananier et ses besoins	p.2
b. Une maîtrise de la fertilisation nécessaire	p.2
c. Méthode du bilan azoté	p.4
2. Intérêts des plantes de couverture.....	p.5
3. Minéralisation de la matière organique du sol	p.6
4. La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique chez les Légumineuses.....	p.7
B. Problématique	p.8
III. Matériels et méthodes	p.9
A. Présentation du PRAM	p.9
B. Site expérimental	p.9
1. Caractéristiques générale	p.9
2. Le sol brun rouille à halloysite	p.10
C. Dispositif expérimental	p.10
1. Evaluation de la minéralisation nette sur sol brun rouille à halloysite et constitution d'une gamme de sols	p.10
a. Choix des sols	p.10
b. Echantillonnage des sols.....	p.13
c. Préparation des pots.....	p.14
d. Contrôle de l'arrosage automatique	p.15
e. Suivi de l'azote dans le sol.....	p.15
2. Evaluation de la croissance de plantes de couverture sur la gamme de sol.....	p.17
a. Choix des plantes de couverture.....	p.17
b. Protocole	p.18
c. Inoculation en rhizobium	p.19
d. Désherbage.....	p.19
e. Détermination de la teneur en carbone et azote totaux.....	p.20
f. Evaluation de la fixation symbiotique.....	p.20

IV. Résultats.....	p.22
A. Evaluation de la minéralisation nette sur sol brun rouille à halloysite et constitution d'une gamme de sols.....	p.22
B. Evaluation de la croissance des plantes de couverture sur la gamme de sol	p.24
1. Analyse de la matière sèche.....	p.24
a. Analyse graphique	p.24
b. Analyse statistique.....	p.25
2. Analyse de la nodulation	p.26
a. Effet de la teneur en matière organique du sol sur la nodulation	p.26
b. Analyse statistique qualitative	p.28
C. Evaluation des quantités d'azote absorbée et approche de la fixation symbio.....	p.29
1. Absorption du concombre	p.29
2. Réalisation d'un bilan de l'azote sur les pots de concombre.....	p.29
3. Absorption des Légumineuses.....	p.30
a. Analyse graphique	p.30
b. Analyse statistique.....	p.33
V. Discussion	p.34
Les teneurs élevées d'azote et de carbone dépendent des apports fournis au sol.....	p.34
Il existe un effet du sol sur la croissance des plantes.....	p.35
.	
L'adaptation aux conditions de fertilité du sol est similaire pour les trois légumineuses concernant la nodulation.....	p.35
Beaucoup d'azote et peu d'azote dans le sol altèrent la fixation symbiotique	p.35
Une quantité moyenne d'azote dans le sol favorise la fixation symbiotique.....	p.35
L'espèce la plus performante en terme de fixation symbiotique est <i>Pueraria phaseoloides</i> ..	p.36
Conduite de la plante de couverture pour augmenter la fixation symbiotique.....	p.36

Une biologie différente dans les horizons B en comparaison aux horizons A pourrait expliquer les faibles croissance et fixation des plantes ayant poussé sur les horizons B.....p.36

Amélioration de l'expériencep.36

VI. Conclusion et perspectivesp.37

Bibliographiep.38

Abréviationsp.39

Annexesp.40

I.Introduction

L'impact de la révolution verte sur le développement agricole a été considérable. Cela a permis l'amélioration du niveau de vie et la croissance économique dans le monde tropical. Cependant, les inconvénients de cette agriculture, dont les objectifs basés sur la maximisation de la production et celle des profits, sont nombreux : dégradation des paysages, déclin de la biodiversité, érosion, salinisation, pollution des eaux, air, sols (Harry Ozier-Lafontaine, 2009).

Aussi, un des principaux défis pour une agriculture aujourd'hui est la nécessité d'optimiser la production agricole mondiale tout en préservant la fonctionnalité des écosystèmes et en bloquant l'érosion de la biodiversité.

Dans ce cadre, l'UR26 (Systèmes de culture bananiers, plantains et ananas du CIRAD) a défini des programmes de recherche sur les modalités d'amélioration des systèmes de culture afin que la culture bananière réponde au mieux aux exigences de cette nouvelle agriculture.

Aux Antilles françaises, la banane fruit pour l'exportation est le premier produit d'exportation et occupe 30% de la surface agricole en Martinique, 15% en Guadeloupe (Agreste Dom, 2003). Les productions ont longtemps reposé sur la pratique de monocultures intensives sur sol nu utilisant des volumes importants d'intrants. Les herbicides, en particulier, sont utilisés contre les adventices car elles réduisent le rendement à cause de la concurrence pour la nutrition. En, 2006, le diuron, le paraquat, le glyphosate et son métabolite l'AMPA, sont des herbicides responsables des pics de pollution des cours d'eau en Martinique les plus élevés (DIREN, 2006). De ces molécules, seul le glyphosate est encore autorisé et son utilisation est maintenant limitée à 2kg/an/ha (le diquat, le gluphosinate et le fluzifop sont aussi utilisés). Dans les pratiques actuelles, les quantités d'herbicide utilisées sont de l'ordre de 3-4 kg de matière active/ha/an. L'abandon du désherbage total apparaît donc comme une alternative intéressante. L'introduction d'une plante de couverture en bananeraie serait une solution de remplacement aux herbicides qui pourrait aussi assurer des fonctions de protection de l'agrosystème et de l'environnement en général : régulation des populations de bioagresseurs (Lavigne A., 2008), augmentation de la biodiversité du sol, protection contre l'érosion, recyclage et transfert d'éléments nutritifs.

Cependant, l'introduction de ces plantes de couverture vont modifier profondément le fonctionnement de l'agrosystème, notamment en provoquant une concurrence entre les couverts pour la nutrition, en particulier pour l'azote.

Pour réduire cette concurrence, une solution consiste à choisir des plantes de couverture ayant des besoins limités, en recourant à des légumineuses fixatrices d'azote. Expérimentalement au

champ, il est observé une moindre concurrence des légumineuses en association avec le bananier (*Pueraria phaseoloides*, *Stylosanthes guianensis*, *Neonotonia wightii*). Ceci pourrait s'expliquer par la contribution de la fixation symbiotique d'azote atmosphérique à la satisfaction des besoins en azote de la couverture vivante. Cependant, la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses est très variable et peut être réduite en l'absence de souches de rhizobium adaptées mais aussi par de fortes teneurs du sol en azote minéral.

II. Bibliographie et problématique

A Synthèse bibliographique

1. Fonctionnement azoté d'une bananeraie

a) Le bananier et ses besoins

Les travaux des physiologistes (Montagut et Martin-Prével, 1965; Martin-Prével et Montagut, 1966 cité dans Thieuleux, 2006) ont montré que le prélèvement des éléments minéraux par le bananier est plus élevé durant le premier cycle de culture. Pour les cycles suivants, les besoins nutritifs "globaux" des rejets de croissance sont identiques à ceux de la plante en premier cycle, mais sont compensés par les transferts d'azote de la plante mère vers le rejet et par les restitutions des résidus de culture. Feller et al. (1986) et Chotte et al. (1994) soulignent à ce titre que dans les sols tropicaux pauvres en matière organique, une part prépondérante de l'azote biodisponible provient de la minéralisation du pool organique du sol alimenté par les

résidus de culture. En règle générale on estime ainsi, que les deux tiers de l'azote de la plante proviennent de la matière organique du sol, le tiers restant étant fourni par l'engrais.

b) Une maîtrise de la fertilisation nécessaire

L'azote est un élément essentiel de la biomasse végétale. Son rôle est primordial dans la constitution des protéines et des chloroplastes. Cependant, même si l'azote existe sous trois formes dans la biosphère (organique, minérale et gazeuse), c'est principalement la forme minérale soluble qui est consommée par les végétaux. Il est d'ailleurs l'élément minéral le plus consommé par les plantes dans le sol. Les formes ammoniacales (NH_4^+) et nitriques (NO_3^-) sont celles participant à l'alimentation des végétaux.

Dans le contexte actuel où l'agriculture doit produire de façon durable et où le coût des intrants augmente, la maîtrise de l'alimentation azotée du peuplement végétal revêt une importance primordiale. En effet, la quantité d'azote disponible pour la culture au cours de son cycle a un effet direct sur le rendement et la qualité de la production agricole. Ceci est d'autant plus vrai pour le bananier qui ne possède pas d'organe réserve (Lassoudière, 2007).

En outre, la maîtrise de la teneur en nitrates des eaux d'infiltration est une préoccupation environnementale majeure, puisque l'accroissement de cet élément dans les cours d'eau favorise l'eutrophisation. De plus, la réglementation établit à 50 mg/L la teneur maximale autorisée dans l'eau potable. En aval, cette maîtrise est aussi importante pour la protection des écosystèmes marins des Antilles, et notamment des récifs coralliens, particulièrement affectés par l'eutrophisation des eaux.

c) Méthode du bilan azoté

Il existe plusieurs méthodes de diagnostic du statut nutritionnel des cultures en vue de préconiser une fertilisation azotée adaptée. Deux catégories de méthodes peuvent être distinguées : celles basées sur des indicateurs sol et celles basées sur des indicateurs de la nutrition azotée de la plante.

Parmi les méthodes basées sur des indicateurs sols, la méthode du bilan azoté recourt à des analyses de l'azote biodisponible pour les plantes et de l'azote potentiellement minéralisable.

De manière générale, le bilan azoté peut s'écrire de la manière suivante :

$$(Pf - Pi) + Rf = (X - Ix - Gx) + M'n + Ri - L$$

Où P_i est la quantité d'azote accumulée dans le peuplement à l'ouverture du bilan

P_f , la quantité d'azote accumulée dans le peuplement à la fermeture du bilan

R_i , la quantité d'azote accumulée dans le sol à l'ouverture du bilan

R_f , la quantité d'azote accumulée dans le sol à la fermeture du bilan

$M'n$, la minéralisation nette du sol en l'absence d'apport d'engrais

L , le lessivage

X , la dose d'engrais à apporter (calculée par différence)

I_x , l'écart d'organisation entre la dose 0 (culture non fertilisée) et la dose X

G_x , les pertes gazeuses liées à l'apport X

Bien souvent, certains de ces flux sont très faibles ou difficiles à estimer. Il n'est donc pas rare de les négliger. De plus, d'autres flux peuvent encore être pris en compte comme la fixation de l'azote atmosphérique (avec la présence d'une légumineuse ou la fixation symbiotique libre) ou encore les apports atmosphériques.

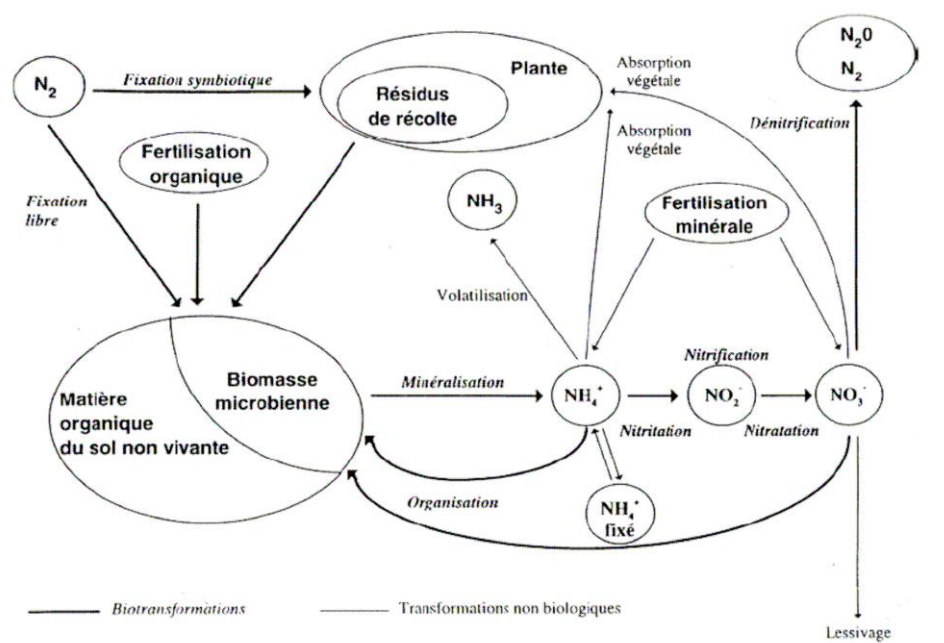


Figure 1. Transformations biologiques et non biologiques affectant le devenir de l'azote dans le sol (d'après Nicolardot et al., 1997)

2. Intérêts des plantes de couverture.

L'association culturale au sens large consiste à faire pousser plusieurs cultures sur une même parcelle. Les avantages attendus d'une telle pratique sont bien souvent une meilleure utilisation des ressources du milieu (Howard et al. 1995). C'est particulièrement le cas lorsque les différentes cultures de l'association intéressent l'agriculteur pour leur production. Dans d'autres cas, une ou plusieurs des cultures présentes n'assurent pas de production et sont destinées à rendre un "service" à l'agriculteur : couverture, ombrage, régulation du parasitisme...). Les exemples les plus évidents de ces cultures "de service" sont les plantes de couverture.

Les plantes de couverture présentent des intérêts multiples. Elles assurent une couverture du sol, luttant ainsi contre la dégradation des sols, les adventices (par étouffement ou concurrence hydrique/nutritive), réduisant ainsi l'utilisation d'herbicide. Elles permettent une diminution de l'impact des pluies sur le sol, une amélioration de la structure du sol et de son infiltrabilité et de sa rétention d'eau. Elles contribuent également à certaines améliorations agronomiques et environnementales: apport de matière organique, éventuellement d'azote, augmentation de la biodiversité, diminution du risque de lixiviation de l'azote.

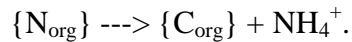
Il existe plusieurs catégories de plante de couverture. On peut tout d'abord faire une distinction entre les plantes de couverture utilisées en association avec la culture principale (vergers enherbés, bananeraies enherbées...) et les plantes de couverture utilisées en interculture ou en jachère.

Cette deuxième catégorie est notamment représentée par les cultures intermédiaires pièges à nitrates qui comme leur nom l'indique permettent de réduire les fuites de nitrates mais également d'éviter de laisser le sol nu pendant l'inter culture et ainsi, limiter l'érosion et le ruissellement.

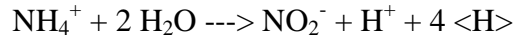
Cependant, malgré les avantages évidents que l'introduction d'une plante de couverture en association avec la culture principale présente, celle-ci induit une concurrence pour les ressources du milieu: les nutriments (principalement azote, mais également K, P...), l'eau et la lumière, qui peut s'avérer problématique si elle se fait au détriment des composantes le plus intéressantes pour le producteur: rendement, productivité...

3. Minéralisation de la matière organique du sol

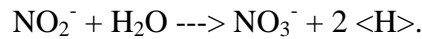
La minéralisation nette de l'azote est la transformation de l'azote organique endogène du sol en azote minéral. La dégradation de l'azote organique libère de l'ammonium.



La nitrification est la conversion de l'ammonium en nitrate qui est réalisée par des bactéries spécialisées. Cette réaction se fait en deux étapes et on ne connaît pas de bactérie capable d'oxyder directement l'ammoniaque en nitrate. L'ammonium est oxydé en nitrite par les bactéries dites nitreuses



et le nitrite est oxydé en nitrate par les bactéries dites nitriques



Dans des conditions de pH très faible et de température élevées, cette transformation peut-être d'origine physico-chimique, ce qui est le cas aux Antilles. Dans les sols tropicaux, les quantités d'azote minéralisées annuellement peuvent varier de quelques dizaines à plus de 150 kg/ha (Bonzi, 2002).

En milieu tempéré, la phase de nitrification, souvent très rapide, justifie que l'on puisse regrouper les mécanismes de minéralisation et de nitrification. On considère ainsi que l'azote minéral disponible pour la plante est sous forme nitrique. Ce n'est pas le cas dans les zones tropicales, les sols étant acides (en particulier les sols brun rouille à halloysite étudiés, où le pH varie entre 4,5 et 5,5), la nitrification est ralentie et la présence de NH_4 peut être importante et doit donc être prise en compte (Sierra *et al*, 2003).

4. La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique chez les Légumineuses

L'ensemble de la vie sur Terre dépend de la fixation de l'azote, une fonction assumée exclusivement par certains procaryotes. Le sol abrite plusieurs espèces de bactéries libres qui font partie des procaryotes fixateurs d'azote. La transformation de l'azote de l'atmosphère (N_2) en ammoniac (NH_3) constitue un processus complexe faisant intervenir plusieurs étapes. Il est toutefois possible de simplifier ce processus en ne signalant que les réactifs et les produits qui entrent en jeu dans la réaction :



La famille des Légumineuses vit en symbiose avec des Bactéries fixatrices d'azote. Leurs racines portent des renflements appelés **nodosités**, qui se composent de cellules végétales renfermant des Bactéries fixatrices d'azote du genre *Rhizobium* (« racine vivante »). Dans une nodosité, les *Rhizobium sp.* deviennent des **bactéroïdes**, c'est-à-dire qu'elles s'agrandissent,

prennent une forme irrégulière et activent la nitrogénase pour fixer l'azote. Chaque légumineuse s'associe avec une espèce (souche) particulière de *Rhizobium* (Campbell, 1995). Le *mutualisme* caractérise la relation symbiotique existant entre une légumineuse et la bactérie fixatrice d'azote. Celle-ci fournit à la légumineuse l'azote fixé, tandis que la légumineuse lui procure les glucides et les autres substances organiques nécessaires à son fonctionnement. La légumineuse et la Bactérie synthétisent chacune une partie d'une molécule appelée **leghémoglobine**. Cette coopération montre le degré de raffinement du processus d'évolution qu'ont connu ces organismes associés. La leghémoglobine est une protéine renfermant du fer qui, comme l'hémoglobine des globules rouges humains, lie l'oxygène de façon réversible. Elle relâche ensuite l'oxygène mis en œuvre dans l'intense processus de respiration cellulaire qui est requis pour produire tout l'ATP nécessaire à la fixation de l'azote. Par ailleurs, la leghémoglobine maintient la concentration d'oxygène libre dans les nodosités des racines à un niveau très faible : ce rôle s'avère particulièrement important puisque l'oxygène libre inhibe la nitrogénase.

La plus grande partie de l'ammonium produit par la fixation symbiotique d'azote sert à la fabrication d'acides aminés dans les nodosités ; ces acides aminés sont ensuite transportés par le xylème vers les ramifications du système caulinaire. Dans des conditions favorables, les nodosités des racines fixent une si grande quantité d'azote qu'elles sécrètent alors dans le sol un excès d'ammonium, augmentant ainsi la fertilité du sol pour les Végétaux qui ne sont pas des Légumineuses. (Campbell, 1995)

Cette restitution d'azote par les légumineuses vers le sol se fait donc de plante à plante par les exsudats racinaires mais elle peut se faire aussi lors de leur décomposition. (Bowen et al, 1993). Le premier cas est le plus intéressant pour une culture en association car il peut en plus apporter de l'azote à la culture. Mais c'est rarement le cas, le plus souvent l'azote est restitué lors de la décomposition des légumineuses.

La fixation symbiotique d'azote se fait généralement lorsque le sol est pauvre en azote, ce qui est rarement le cas dans une culture. Eriksen et al (1998) ont montré que dans une association ray-grass trèfles blanc, le ray-grass absorbe la majorité de l'azote du sol, ce qui sous-entend que le trèfle blanc fixe l'azote atmosphérique pour se développer. (cité dans Février, 2009).

B. Problématique

Les plantes de couverture entrent en compétition avec les bananiers pour la nutrition azotée. En utilisant des légumineuses fixatrices d'azote, on peut espérer que la concurrence

sera moindre mais il faut pour cela que ces plantes fixent suffisamment afin de satisfaire leurs besoins en azote. Or, en bananeraie, le sol est riche et la fixation symbiotique peut être réduite par de fortes teneurs en azote minéral.

Pour l'analyse du fonctionnement ou de la concurrence d'une association d'une légumineuse et de bananiers, nous devons donc mieux connaître les interactions entre offre en azote minéral du sol et la fixation symbiotique des légumineuses utilisées en plante de couverture.

Aussi, si l'on est sensible à ce sujet, plusieurs questions peuvent être posées :

- Quel est l'effet de la disponibilité en azote minéral sur le niveau de fixation symbiotique de trois légumineuses utilisables en plantes de couverture ?
- Quelle est la légumineuse la plus performante en terme de fixation symbiotique ?

Il est donc proposé dans ce travail, sur une gamme de sols présentant une fourniture croissante en azote minéral, d'évaluer la proportion d'azote absorbé par une légumineuse provenant de la fixation symbiotique. Sur cette gamme de sols, l'approche adoptée consiste à évaluer expérimentalement, en milieu contrôlé, l'effet de la disponibilité en azote minéral sur le niveau de fixation symbiotique de trois légumineuses utilisables en plantes de couverture *Pueraria phaseoloides*, *Stylosanthes guianensis*, *Neonotonia wightii* (cette dernière étant apparemment non fixatrice dans les conditions des Antilles) comparativement au concombre (*Cucumis sativus*). Une inoculation en rhizobium sera assurée par une solution constituée à partir d'un broyat de nodules de ces légumineuses prélevées au champ. La fixation d'azote atmosphérique sera déterminée par une méthode découlant de la méthode du bilan de l'azote et par la méthode reposant sur la mesure de l'abondance isotopique $\delta^{15}\text{N}$.



III. Matériels et méthodes

A. Présentation du PRAM

Le Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique (PRAM) est un Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS). Situé à Petit Morne, au Lamentin, il dispose d'une vingtaine d'hectares de terrain, à Rivière Lézarde, pour des expérimentations. Il rassemble des équipes de trois

établissements publics qui interviennent dans le domaine de la recherche et du développement agro-environnemental en Martinique: le Cemagref, le Cirad et l'IRD.

Le principal objectif du PRAM est de contribuer au développement durable et solidaire de la Martinique en essayant d'offrir des réponses au double défi d'une prise en compte de l'environnement et du renouveau de l'agriculture dans un milieu insulaire tropical riche d'une biodiversité remarquable mais marqué par de fortes contraintes.

B. Site expérimental

1. Caractéristiques générales

La Martinique est caractérisée par une grande diversité de situations pédologiques et climatiques qui conditionnent l'itinéraire technique de la culture bananière. La majorité des exploitations bananières est localisée sur andosol (nord de l'île) et sur sol brun rouille à halloysite (centre et est de l'île), ces derniers sols représentant 23 % des sols trouvés en zone tropicale

Dans le cadre de cette étude, tous les échantillons de terre ont été prélevés dans une forêt de l'exploitation bananière Rivière Lézarde et dans des parcelles de la station de Rivière Lézarde (appartenant au Cirad) qui se trouve dans la région centrale de la Martinique sur sol brun rouille à halloysite.

2. Le sol brun rouille à halloysite

Les sols bruns rouille à halloysite (Colmet-Daage et Lagache, 1965; nitisol selon la classification FAO1992) sont des sols apparentés aux sols peu évolués à allophane. Ces deux types de sols sont issus de projections volcaniques de cendres ou ponces perméables mais les sols à allophane sont situés dans des régions plus humides, tandis que la saison sèche plus marquée au centre de l'île, provoque une transformation irréversible des allophanes en argiles 1/1 (halloysite ou kaolinite hydratée) par une alternance de cycle humectation-dessication et permet la formation des sols bruns.

C. Dispositif expérimental

1. Evaluation de la minéralisation nette sur sol brun rouille à halloysite et constitution d'une gamme de sols

a. Choix des sols

En préalable à l'étude, 19 sols correspondant à différentes situations culturales sur sol brun rouille à halloysite ont été collectés:

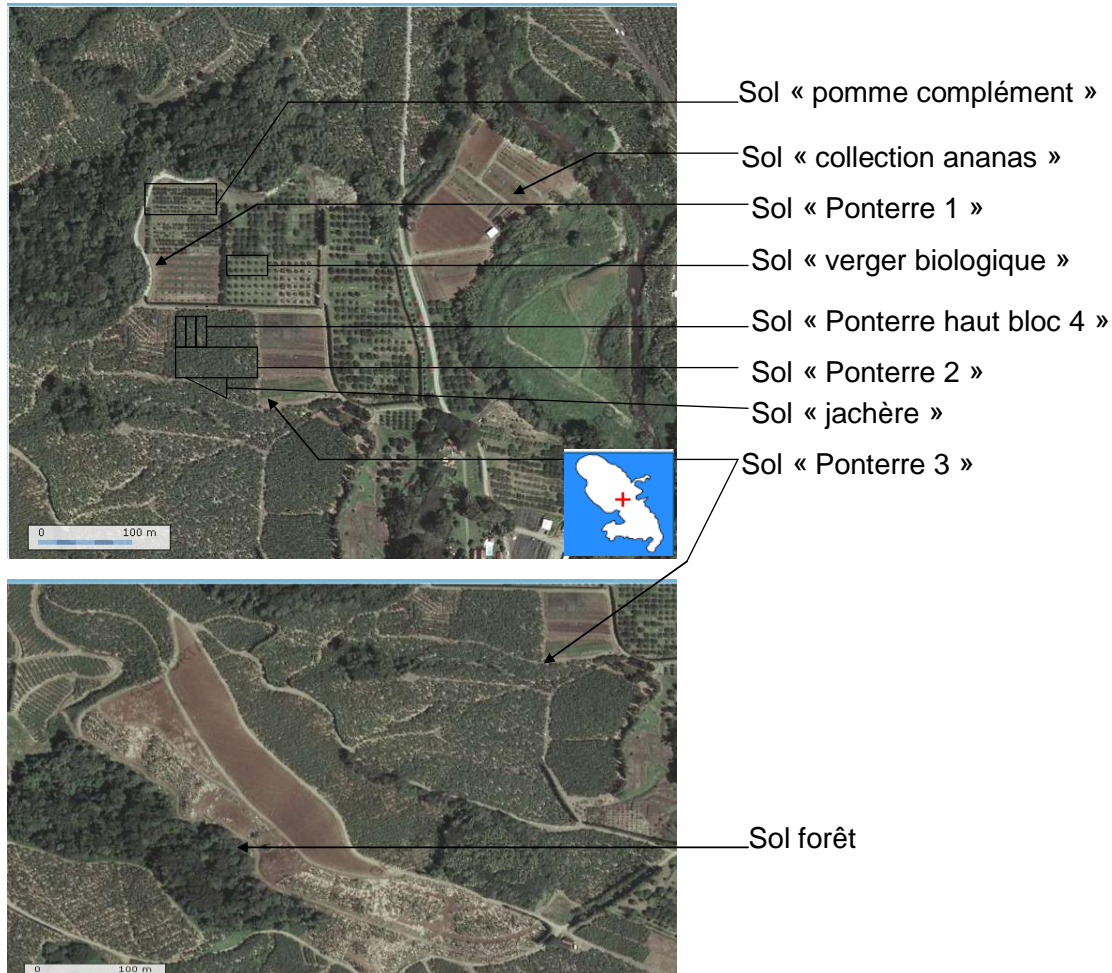


Figure 2. Photo aérienne de la station de Rivière Lézarde (source IGN)

Tableau 1. Description des 19 sols

Parcelle	Horizon	Profondeur de prélèvement	Couvert présent
Pomme complément	HA	0-30cm	Sol nu
	HB	>50cm	Sol nu
Verger biologique	HA	0-20cm	Sol nu
	HB	30-50cm	Sol nu
Ponterre Haut Bloc 4	HA	0-20cm	Résidus de bananiers

Grand rang	HA	0-30cm	Sol nu
	HA	0-30cm	Sol enherbé
Ponterre 2 Bloc 1	HA	0-30cm	Sol nu
	HA		<i>Paspalum notatum</i>
	HA		<i>Stylosanthes guianensis</i>
	HA		<i>Pueraria phaseoloides</i>
	HA		<i>Neonotonia wightii</i>
	HA		Couvert spontané
Ponterre 2	HA	0-30cm	Jachère spontanée
Forêt	HA	0-10cm	Forêt
	HB	30-50cm	Forêt
Collection ananas	HA	0-30cm	Sol nu
Ponterre 1 Bas	HA	0-30cm	Jachère
Ponterre 3	HA	0-30cm	Sol nu

Dans les parcelles choisies, il se peut qu'il n'y ait jamais eu de fertilisation humaine à l'aide d'engrais: c'est le cas de la forêt. Dans les autres parcelles, il n'y a pas eu d'apports d'engrais depuis plusieurs années: les sols du bloc 1 de Ponterre 2 par exemple, sont situés dans des inter-rangs qui sont des zones non fertilisées, dans cet essai, en bananeraie. La parcelle pomme complément est une jachère longue durée (depuis 2002). "Ponterre 1 Bas" est une jachère depuis 2007. Le verger biologique n'a reçu que des apports organiques et n'était plus fertilisé depuis plus de six mois.

En conséquence, la teneur en azote minéral de ces sols que l'on va mesurer sera représentative de la minéralisation naturelle de la matière organique. Les valeurs qui seront obtenues ne seront pas biaisées par des apports extérieurs.

Nous avons prélevé ces différents sols afin de disposer d'une gamme ayant une disponibilité en azote en partant de valeurs très faibles vers des valeurs élevées.

Ensuite, à partir de cette gamme de sol, il a été réalisé une gamme de substrat de culture ayant une offre en azote croissante. Pour ce choix, on a recherché aussi à sélectionner des sols pouvant présenter une forte valeur de $\delta^{15}\text{N}$ (sols ayant reçu de faibles apports d'engrais azotés de synthèse). On a donc fait nos expérimentations en pots sur une gamme de huit sols.

Tableau 2. Description des huit sols

Parcelle	Couvert présent	Historique	Horizon	Apport d'engrais	Apports de MO	Signal isotopique attendu
forêt	Forêt	forêt	HA	néant	litière forêt	fort
			HB	néant	-	fort
verger biologique	Sol nu (interculture)	Verger bio	HA	engrais organique	résidus de taille	fort
			HB	néant	-	fort

Ponterre J	jachère spontanée	jachère depuis 2005, succédant à 10 ans de banane	HA	néant	litière couvert spontané	moyen
Pomme complément	sol nu (interculture)	jachère depuis 2006, succédant à 10 ans de verger	HA	néant	litière couvert spontané	moyen
			HB	néant	-	moyen
Ponterre Haut Bloc 4 Grand rang	sol nu		HA	néant	-	

b. Echantillonnage des sols

L'échantillon est dit composite car il faut qu'il soit représentatif de la parcelle. On a donc fait des prélèvements à différents endroits dans la parcelle et on mélange le tout d'où l'emploi du terme composite.

On a fait dix points de prélèvements pour les horizons de surface (HA) et cinq points de prélèvements pour les horizons de profondeur (HB).

c. Préparation des pots

Les huit sols ont été tamisés à 5mm. Les pots utilisés ont une contenance de deux litres. Des dessous de pots ont été utilisés pour éviter le lessivage. Les sols ayant des taux d'humidité différents, il a été décidé d'introduire 1,25 kg de sol sec par pot quelque soit le sol. Ainsi, seul le poids de sol humide va varier. Cependant, des erreurs de manipulations nous ont contraints à mettre 1,24 kg de sol sec de verger biologique horizon B par pot. (Voir annexe 1)

-Détermination du pH dans l'eau et le KCl 1M

Principe: Mise en équilibre ionique entre la phase solide et la phase liquide (10g de terre pour 25ml d'eau distillée. Mesure dans des conditions déterminées de la différence de potentiel existant entre une électrode de mesure et une électrode de référence plongées dans une solution aqueuse en équilibre avec l'échantillon de sol. La mesure s'effectue à l'aide d'une électrode de verre combinée et d'une électrode de référence trempant dans une suspension de sol.

-Amendements et fertilisation de fond

La détermination du pH des huit sols a révélé que la moitié d'entre eux avaient une valeur de pH inférieure à 5. Par conséquent un amendement calcique a été administré aux sols afin qu'ils aient tous un pH au moins égal à 5,7. Cet amendement contient 32% de CaO et a été tamisé finement pour que l'action soit rapide.

Afin de connaître la quantité d'amendement à rajouter, une courbe d'évolution du pH en fonction du chaulage a été utilisée (voir annexe 2).

D'autre part, les plantes qui ont poussé dans les sols ne devaient souffrir d'aucune carence. Un engrais a donc été rajouté. Il contenait du phosphore, potassium, magnésium, bore, cuivre, fer, manganèse, molybdène, zinc et surtout pas d'azote car les sols devaient conserver leur forte valeur de $\delta^{15}\text{N}$.

d. Contrôle de l'arrosage automatique.

Les pots ont été placés sous serre. Aussi, l'arrosage automatique se substituera aux pluies. Il faut que la répartition de l'eau soit uniforme car tous les pots doivent bénéficier des mêmes conditions hydriques. En conséquence, les asperseurs choisis répartissaient l'eau de façon à ce que l'on voit un "brouillard".

Une étude de la répartition de l'eau a été menée pour vérifier l'homogénéité de la distribution de l'eau. Elle a été réalisée en utilisant des dessous de pot placés à l'endroit où se trouveraient les pots. L'arrosage automatique a été ensuite déclenché, pendant cinq minutes, et on a mesuré la quantité d'eau contenue dans les dessous. On a pu ainsi constituer une carte de la répartition des précipitations (Voir annexe 3).

Cette dernière a mis en évidence une hétérogénéité dans la répartition des précipitations. Les pots n'auraient donc pas reçu la même quantité d'eau. On a résolu ce problème en faisant de la randomisation: on a déplacé les pots sur la table de manière aléatoire régulièrement. La randomisation a permis également de ne favoriser ni défavoriser certaines plantes quant aux conditions d'éclairement.

e. Suivi de l'azote dans le sol

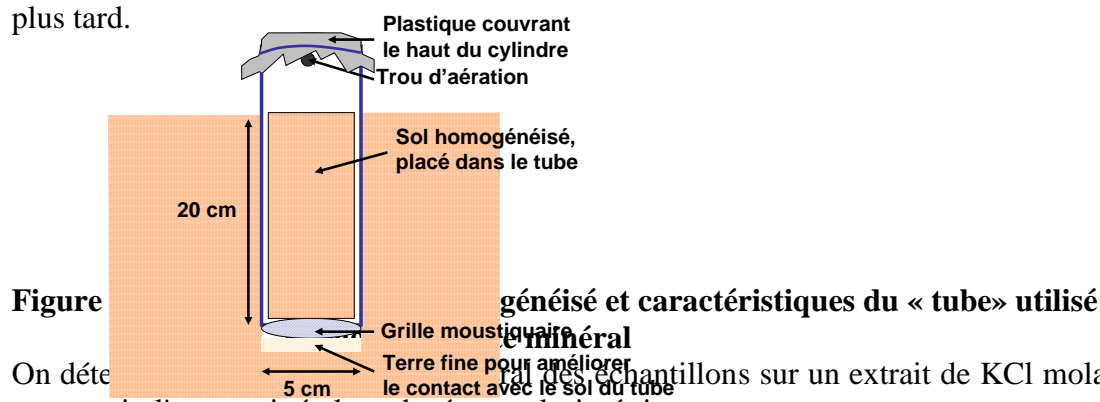
- Minéralisation in situ

Principe: Cette technique consiste à prélever un échantillon composite de sol, l'introduire dans un cylindre et le remettre dans son milieu naturel afin d'observer la minéralisation.

Lorsque le cylindre sera remis dans le sol, il sera couvert à l'aide d'un film plastique qui empêchera l'infiltration de la pluie dans le tube. Ainsi, on supprime le drainage que causerait la pluie.

Les processus de minéralisation se font en présence d'oxygène. Or, la pose du film plastique entraîne des conditions anaérobies à l'intérieur du cylindre. On y remédie donc en perçant ce tube de trous.

La partie du cylindre enfouie dans le sol, doit être à son contact afin que l'échantillon ait la même humidité que le sol. Par conséquent, pour réaliser cette condition, on met à l'extrémité du tube une toile de type "moustiquaire". L'eau du sol va donc remonter par capillarité du sol jusqu'à l'échantillon sans que le maillage ne gêne sa progression. Une aliquote suffisante pour les analyses au laboratoire est prélevée. Le sol est laissé dans le tube pendant trois semaines au champ, puis est retiré pour analyses. La minéralisation nette correspond à la différence de la quantité d'azote minéral présente avant mise en tube au champ et celle calculée trois semaines plus tard.



On détermine l'azote minéral par des échantillons sur un extrait de KCl molaire et sur cet extrait, l'azote minéral est dosé par colorimétrie.

Principe: Le principe de ce dosage est basé sur la formation de complexe coloré:

- les nitrates sont réduits en nitrites par l'hydrazine. Les nitrites NO_2^- , forment un composé rouge pourpre à pH de 2 à 2.5 en présence de sulfanilamide et de N-(1-naphtyl)-éthylendiamine dihydrochloride mesurés à 520 nm.
- NH_4^+ forme en présence de la solution de salicylate et d'hypochlorite un composé bleu que l'on mesure à 660 nm.

Les résultats seront exprimés en mg/kg de sol frais. Or les cinq sols échantillonnés ont des humidités différentes. Si l'on veut faire des comparaisons pertinentes, il vaut mieux faire nos calculs avec des kg de sols secs. Pour cela, on va déterminer l'humidité résiduelle des échantillons du sol.

-Détermination de l'humidité résiduelle des échantillons de sol

Principe: Les échantillons sont séchés à l'étuve à $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante. 48 heures, suffisent généralement. La différence entre le poids avant et après séchage exprime la teneur en eau de l'échantillon initial.

-Extraction et dosage de l'azote minéralisable, modification de la méthode de Waring-Bremner

Principe: l'azote ammoniacal, produit par la minéralisation en anaérobiose pendant 14 jours à 30°C de l'azote organique dans des tubes spéciaux, est extrait par une solution de KCl normal et dosé par colorimétrie automatique au dichloroisocyanurate de sodium.

2. Evaluation de la croissance de plantes de couverture sur la gamme de sol

a. Choix des plantes de couverture

L'utilisation d'une légumineuse comme plante de couverture est en théorie intéressante puisqu'en fixant l'azote atmosphérique, elle n'entre pas en compétition avec le bananier pour les ressources en azote minéral du sol. En pratique, lorsque l'offre en azote minéral du sol est trop importante la légumineuse ne fixe pas l'azote de l'air. En effet, la mise en place de la fixation est inhibée par les fortes teneurs en azote minéral et en absence de souches de rhizobium adaptées dans la zone de présence des nodosités.

Afin de limiter la compétition pour l'azote entre la plante de couverture et le bananier, il est nécessaire d'opter pour une espèce qui ne produit pas trop de biomasse. Elle doit néanmoins présenter une couverture du sol suffisante pour ne pas être envahie par d'autres espèces. En outre elle doit être suffisamment tolérante pour résister à l'ombrage d'une bananeraie établie.

En conséquence, les légumineuses suivantes ont été choisies : *Pueraria phaseoloides*, *Stylosanthes guianensis* et *Neonotonia wightii* (cette dernière étant apparemment non fixatrice dans les conditions des Antilles). Elles devaient être comparées à *Paspalum notatum* qui est une graminée non fixatrice. Mais, la germination de cette dernière a été trop tardive et les plantules étaient trop peu nombreux. *Paspalum notatum* a donc été remplacée par le concombre *Cucumis sativus* qui est une plante non fixatrice.



Figure 4. *Pueraria phaseoloides*



Figure 5. *Neonotonia wightii*



Figure 6. *Stylosanthes guianensis*

a. Protocole

Les plantes testées ont été mises à germer sur un substrat ne fournissant pas d'azote (mélange tourbe et sable). Les plantules ont été ensuite transplantées dans des pots de deux litres contenant les 8 sols choisis. Quatre répétitions ont été effectuées pour chaque couple sol-plante. La mise en place de ce protocole a représenté 128 pots.

Tous ces pots contenaient des plantes et on voulait mesurer la minéralisation des sols sans que les plantes n'absorbent l'azote minéral du sol. Ainsi, deux pots « sol nu » pour chaque sol ont été rajoutés au protocole. Cela représente normalement 16 pots mais il n'y a eu que 15 pots car il ne restait pas assez de terre du sol « berger biologique horizon B » pour faire deux pots.

De plus, le concombre étant une plante fragile car très demandeuse en eau, sa culture représentait un risque. Afin de prévenir ce dernier, deux pots, où du concombre a été planté, ont été rajoutés pour chaque sol. Cela correspond à 16 pots de plus.

Par ailleurs, les plantes ont poussé durant deux mois. Cependant, on a voulu avoir un point intermédiaire après un mois et demi de croissance. Aussi, il a fallu rajouter des pots : les trois légumineuses ont donc été plantées sur trois sols ayant des teneurs en azote minéral différentes (jachère, verger biologique HA, Ponterre Haut Bloc 4 Nu). Deux répétitions ont été effectuées pour chaque couple sol-plante, ce qui représente 18 pots.

Au total, il a fallu contrôler 177 pots pendant un mois et demi puis 159 pots au terme de l'expérience.



Figure 7 . Disposition a léatoire des pots

b. Inoculation en rhizobium

Deux inoculations en rhizobium ont été assurées par une solution constituée à partir d'un broyat de nodules de ces légumineuses prélevées au champ.

c. Désherbage

Désherbage: Les mauvaises herbes, en poussant, prélèveraient l'azote minéral du sol, ce qui fausserait les résultats. De plus, elles gêneraient la croissance des plantes. Ainsi, un désherbage manuel a été fait tous les deux jours.

e. Détermination de la teneur en carbone et azote totaux après combustion sèche

Principe: L'échantillon solide, placé dans une capsule d'étain, est introduit dans un four à 950°C traversé par un courant d'hélium. Un apport d'oxygène provoque une montée en température très brève (1800°C) et une combustion totale. Les teneurs respectives en C et N sont quantifiées par conductibilité thermique (catharométrie) après une calibration appropriée avec des substances de composition connue en C et N.

f. Evaluation de la fixation symbiotique

- Evaluation de la fixation symbiotique par bilan de l'azote en microcosme en fonction du niveau de minéralisation nette du sol.

L'évaluation de la fixation symbiotique des légumineuses peut être réalisée facilement en conditions contrôlées en microcosme en établissant un bilan de l'azote.

En contrôlant les apports d'eau pour maintenir le sol proche de la capacité au champ, dans le bilan de l'azote, le lessivage peut être considéré comme nul et la volatilisation négligeable. En effet, pour un sol, à partir de l'absorption d'azote d'une légumineuse comparativement à celle obtenue pour une plante non fixatrice il est possible d'estimer la quantité d'azote fixée par la légumineuse (cf annexe 4).

-Evaluation de la fixation symbiotique par la méthode de l'abondance naturelle en ^{15}N

Cette méthode est basée sur l'existence de deux isotopes stables de l'azote (N): le ^{14}N et le ^{15}N , ce dernier étant largement minoritaire (il représente 0,366% du N atmosphérique). Le rapport des concentrations entre ces deux isotopes est stable dans l'atmosphère, mais peut se révéler différent dans le sol ou dans les végétaux. En effet, les composés contenant du ^{15}N tendent à réagir plus lentement que leurs homologues contenant du ^{14}N . Les processus biologiques de transformation de l'azote, dont dépend le passage du N d'un compartiment à un autre (e.g. minéralisation de l'azote organique par la microflore du sol), vont ainsi causer un fractionnement isotopique. L'histoire particulière de chaque sol en terme d'occupation et de gestion complexifie encore ces données (Koerner et al., 1997), notamment par les apports de fertilisants. Il en résulte un enrichissement ou un appauvrissement relatif du sol et des végétaux en ^{15}N par rapport à l'atmosphère. On exprime ces différences par la *valeur d'enrichissement isotopique en ^{15}N* , notée $\delta^{15}\text{N}$:

$$\delta^{15}\text{N} = \frac{[^{15}\text{N}]/[^{14}\text{N}]_{(ech)} - [^{15}\text{N}]/[^{14}\text{N}]_{(atm)}}{[^{15}\text{N}]/[^{14}\text{N}]_{(atm)}} * 1000$$

Bien entendu la valeur de $\delta^{15}\text{N}$ d'un sol n'est pas homogène mais varie notamment selon la profondeur (Nadelhoffer & Fry 1988, Handley & Raven 1992, Pate et al. 1993, Högberg 1997, Emmett et al. 1998, Hendricks & Boring 1999, Martinelli et al. 1999, Novak et al. 2003).

La façon dont les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ vont nous permettre de déduire le taux de fixation (%Ndfa) d'une légumineuse est théoriquement simple. Cette dernière prélevant son azote en partie dans l'atmosphère et en partie dans le sol, sa valeur de $\delta^{15}\text{N}$ doit être comprise entre celle d'un fixateur de la même espèce ayant poussé sur un substrat dépourvu d'azote et n'ayant ainsi prélevé son azote que dans l'atmosphère ($\delta^{15}\text{N}_{\text{fix}}$), et celle d'une plante de référence non fixatrice ($\delta^{15}\text{N}_{\text{ref}}$), prélevant uniquement l'azote du sol, et de manière similaire à notre fixateur, ce qui implique que les deux plantes soient le plus proches possible en terme de: système racinaire, profondeur d'enracinement, période de croissance, groupe taxonomique, et mychorizes. Plus l'enrichissement isotopique de notre légumineuse ($\delta^{15}\text{N}_{\text{leg}}$) est proche de celle de la plante de référence, plus son taux de fixation est faible, et inversement.

On le calcule ainsi:

$$\% Ndfa = \frac{(\delta^{15}\text{N}_{\text{ref}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{leg}})}{(\delta^{15}\text{N}_{\text{ref}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{fix}})} * 100$$

Hypothèse :

On a $-2 \leq \delta^{15}\text{N}_{\text{fix}} \leq 0$

IV. Résultats

A. Evaluation de la minéralisation nette sur sol brun rouille à halloysite et constitution d'une gamme de sols

Durant ce stage, nous avons évalué, à partir d'une gamme de situations présentant une fourniture croissante en azote minéral, la proportion d'azote absorbée par une légumineuse provenant de la fixation symbiotique.

Pour constituer cette gamme, nous avons collecté dix-neuf sols correspondant à différentes situations culturales sur sol brun rouille à halloysite (cf. tableau 1) sur lesquels ont été déterminées la teneur en carbone et en azote total (18 sols sont représentés et pas 19).

Tableau3. Teneurs en carbone, azote et C/N des 19 sols

Sols	FA	VA	PTR2 SG	PTR2 RefT0	PTR2 SP	PTR2 PN	PT3	PTR2 PP	PCA	PTR2 NW	PT1	PTR Hb	J	Ana	PTR Nu	FB	VB	PCB
Carbone (g%g)	4,63	3,12	2,59	2,51	2,31	2,26	1,96	1,89	1,87	1,80	1,74	1,64	1,63	1,51	1,43	1,38	1,2	1,1
Azote (g%g)	0,47	0,29	0,26	0,21	0,23	0,23	0,20	0,19	0,19	0,18	0,29	0,28	0,17	0,19	0,15	0,22	0,2	0,15
C/N	9,93	10,66	10,11	11,87	10,26	9,70	9,66	10,2	9,92	10	5,92	5,87	9,34	7,76	9,77	6,28	5,9	7,3

Nous constatons une importante variabilité de ces teneurs entre les différentes situations culturales:

- FA a les plus fortes teneurs en carbone (4,63g%g) et en azote (0,47g%g).
- VA possède les secondes plus fortes teneurs avec 3,12 g%g de carbone et 0,29 g%g d'azote.
- Les sols issus de différentes pratiques expérimentales sur la parcelle PTR2(différents types de plantes de couverture en association) au sein d'une parcelle présentent une variabilité importante de teneur en C et N total,
- PTRNu correspondant à une situation avec très peu de restitution de matière organique (inter-rang de bananeraie désherbée sans restitution de résidus de bananier) ainsi que tous les horizons B tels que VB, FB et PCB font partie des sols ayant les plus faibles teneurs
- les fortes teneurs en carbone correspondent aux fortes teneurs en azote et inversement. On peut donc étudier l'effet de l'azote total en le remplaçant par l'effet de carbone total qui est révélateur de la matière organique.

De plus, une évaluation de la quantité d'azote minéralisable a été faite par la méthode Waring Bremner à partir de ces sols. Pour cela, une analyse de la teneur initiale en azote minéral a été déterminée.

En fin d'incubation par la méthode Waring Bremner, les analyses ont révélé une quantité non négligeable de nitrates NO_3^- . Nous avons du en tenir compte et par conséquent, les résultats du Waring ont été interprétés à l'aide de la teneur en azote minéral et non celle du NH_4^+ . Après 14 jours, une indication de la capacité de minéralisation de ces 19 sols a été obtenue (cf. figure 1).

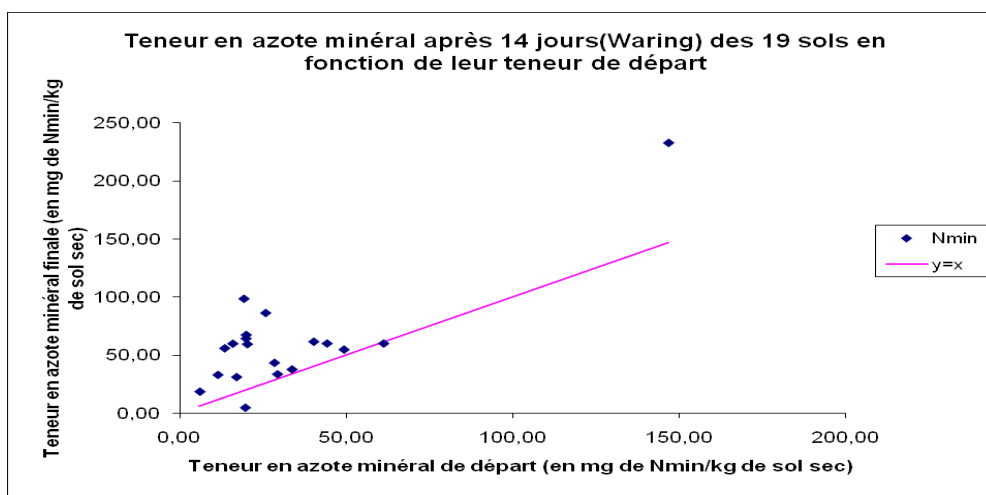


Figure 8. Teneur en azote minéral après 14 jours (Waring) des 19 sols en fonction de leur teneur de départ

Les points situés au-dessus de la droite d'équation $y=x$ signifie que les teneurs après 14 jours de Waring sont supérieures aux teneurs de départ et donc qu'une minéralisation de l'azote organique a eu lieu.

L'observation de ce graphe révèle bien une variabilité dans la capacité à minéraliser. Notons toutefois qu'il y a un point aberrant correspondant au sol "Ponterre 2 Nu" qui aurait une teneur de départ plus forte que sa teneur finale. Nous pouvons faire l'hypothèse que ce sol a très peu libéré d'azote au cours des 14 jours et que cette valeur négative provient des marges d'erreurs liées à la détermination des teneurs en azote minéral.

Ces résultats montrent que ces situations représentent une gamme de sols ayant différents niveaux de fourniture en azote minéral. Sur la base de ces 19 sols, il est possible de sélectionner un sous échantillons de 8 sols représentatifs de la gamme de fourniture en azote du sol (cf. graphique 2). Pour ce choix nous avons aussi recherché des sols pouvant présenter une forte valeur de $\delta^{15}\text{N}$ (sols ayant reçu de faibles apports d'engrais azotés de synthèse) pour favoriser une interprétation des richesses isotopiques de plantes pouvant y être cultivées.

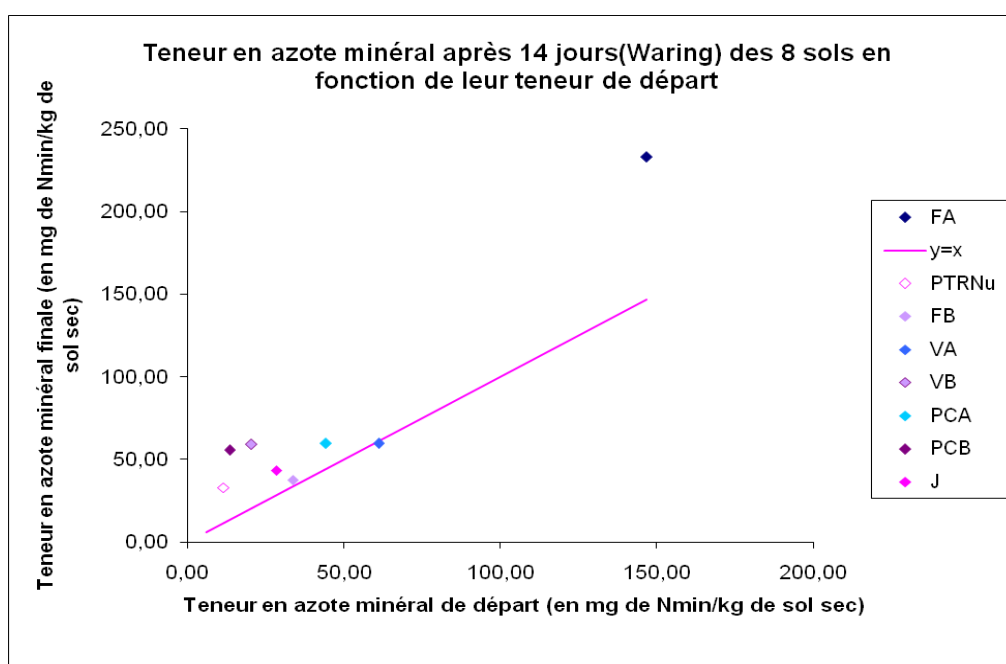


Figure 9. Teneur en azote minéral après 14 jours(Waring) des 8 sols en fonction de leur teneur de départ

Ce graphique révèle bien la gamme de substrat de culture constituée par ces huit sols en termes de teneurs en azote minéral de départ et de capacités de minéralisation :

- FA qui a à la fois une forte teneur de départ et la plus grande capacité de minéralisation,
- PCA et VA qui ont une teneur de départ moyenne mais présente une capacité de minéralisation assez faible,
- PTRNu et J qui ont des teneurs de départ faibles et une faible capacité à minéraliser.
- VB et PCB qui ont des teneurs de départ faibles mais des capacités de minéralisation au-dessus de PTRNu et FB.
- FB, qui avait une teneur de départ de 33,70 mg de Nmin/kg de sol sec et une faible minéralisation après 14 jours.

Cette évaluation de la minéralisation nette devait ensuite être complétée par une quantification des capacités de minéralisation des 19 sols in situ en bananeraie. Mais les résultats obtenus ont été peu probants avec sept sols sur 19 qui présentaient une minéralisation nette négative. Par conséquent, ces analyses n'ont pas été exploitées.

B. Evaluation de la croissance des plantes de couverture sur la gamme de sol

1. Analyse de la matière sèche

a. Analyse graphique

Après deux mois de croissance sur les huit sols, les plantes ont été coupées et une moyenne de leurs matières fraîche et sèche par sol a été déterminée.

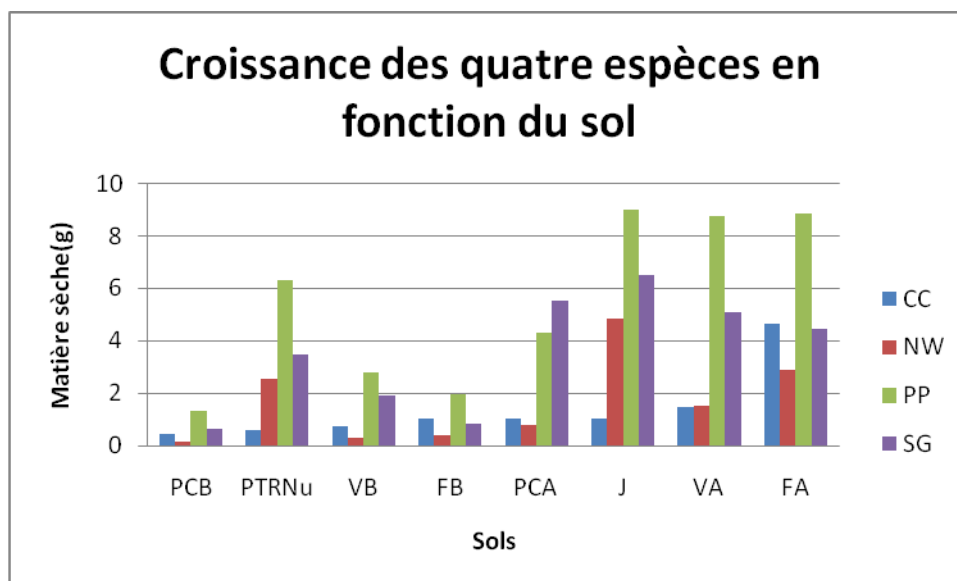


Figure 10. Croissance des quatre espèces en fonction des différents sols

Qu'il s'agisse de l'analyse de la matière fraîche ou sèche, les variations de biomasse en fonction des sols ont été très similaires. Pour l'interprétation, l'analyse de la variation de la matière sèche a été privilégiée (figure..).

Nous constatons que les plus fortes valeurs de biomasse ont été obtenues pour la jachère, et les horizons A du verger biologique et de la forêt. Les valeurs intermédiaires de biomasse concernent les horizons A de pomme complément (PCA) et PTRNu. Enfin, les plus faibles valeurs de biomasse sont trouvées sur les horizons B.

D'autre part, en comparant les résultats obtenus sur concombre (cf. graphique construit en ordonnant en abscisse les sols par ordre croissant de production de biomasse du concombre), on note généralement aussi sur les autres espèces des valeurs en général plus élevées sur les sols issus des horizons A par rapport à ceux issus des horizons B. On en déduit que les biomasses des horizons A sont plus importantes que celles des horizons B.

Le concombre n'étant pas une plante fixatrice, la biomasse sèche de 4,66g obtenue par cette espèce sur FA-terrain riche en azote- et celle de PP sur ce même sol qui représente 8.85g comparativement à la biomasse respective de ces deux espèces sur PTRNu-un sol moins riche où les biomasses sont de moins de 1g et 6,3g- semblent indiquer une moindre incidence de la limitation de la fertilité sur la croissance, qui pourrait provenir d'une fixation symbiotique l'azote de l'air.

b. Analyse statistique

L'analyse statistique des effets du sol et/ou de l'espèce sur la biomasse sèche des différentes espèces montre :

- un effet hautement significatif sur la variable expliquée Log(biomasse sèche/pot) du sol et de l'espèce,
- une interaction hautement significative de ces deux facteurs sur cette variable (cf annexe 5).

Pour une interprétation plus simple, nous avons privilégié une analyse espèce par espèce. Par conséquent, nous avons fait une analyse de variance de NW, PP SG séparément. Au lieu de travailler sur les mesures de biomasse sèche par pot, leur logarithme a été utilisé car cette façon d'opérer permet de normaliser la distribution qui était dissymétrique. En outre, pour les quelques observations ayant des résidus suspects il est apparu que l'on garde ces observations ou non, le résultat de l'analyse statistique est peu modifié et l'effet du facteur contrôlé sur la variable expliquée reste hautement significatif quel que soit l'espèce (tableau..).

De plus, pour toutes les espèces, il existe un fort pourcentage de la variabilité de la variable Log(biomasse sèche/pot) qui est expliquée par la liaison avec le facteur sol. On peut en déduire que l'effet du sol a une influence déterminante sur la biomasse sèche des parties aériennes de ces quatre espèces.

Tableau 4. Résumé de la probabilité obtenue lors de l'analyse de variance de l'effet sol par espèce sur Log (Biomasse)

Espèce	Concombre	NW	PP	SG
Probabilité p(sol)	0,000	0,000	0,000	0,000
R carré (%)	94,9	63,13	90,19	92,09

Néanmoins, si l'on prend l'exemple de NW (cf annexe 6), la comparaison de moyennes deux à deux sur les niveaux de sol montre qu'en comparant FA aux autres sols, il n'y a que pour les sols FB et PCB qui présentent une biomasse sèche significativement plus faible.

2. Analyse de la nodulation

a. Effet de la teneur en matière organique du sol sur la nodulation

A l'issue des deux mois de croissance, la partie racinaire des plantes a été étudiée. La biomasse racinaire et nodulaire de chaque pot a été pesée :

- le poids frais de nodules par le poids frais de racines, qui permet de calculer un ratio Poids frais nodules/Poids frais racine.

Pour les interprétations graphique et statistique nous avons préféré utiliser ce dernier ratio car celui est indépendant de la biomasse racinaire ($R^2=0,11$). En effet, si par exemple, le poids frais de racines avait été utilisé pour expliquer le poids sec aérien, cela n'aurait pas été intéressant car cette variable n'aurait pas été indépendante. C'est normal car la physiologie de la plante lie le poids de racines au poids aérien.

Le ratio de poids frais de nodules par le poids frais de racines a été étudié en fonction du pourcentage de carbone total chez les trois légumineuses (figure...). Ce dernier a été utilisé car il représente une indication chiffrée du pourcentage de matière organique dans les différents sols.

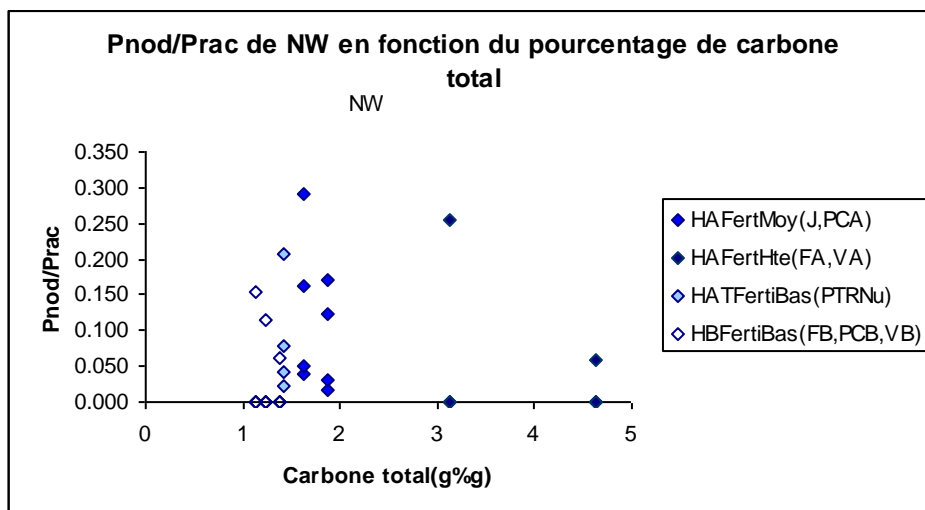


Figure 11. Pnod/Prac de NW en fonction du pourcentage de carbone total

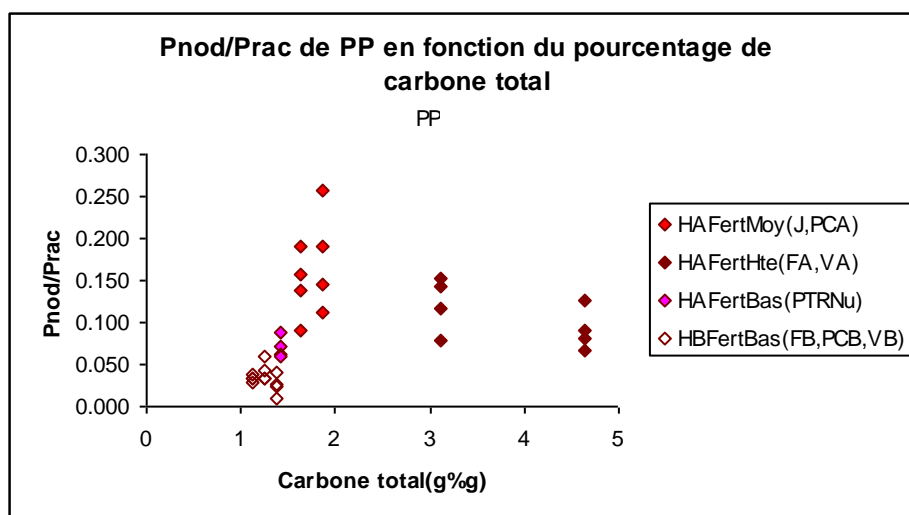


Figure 12. Pnod/Prac de PP en fonction du pourcentage de carbone total

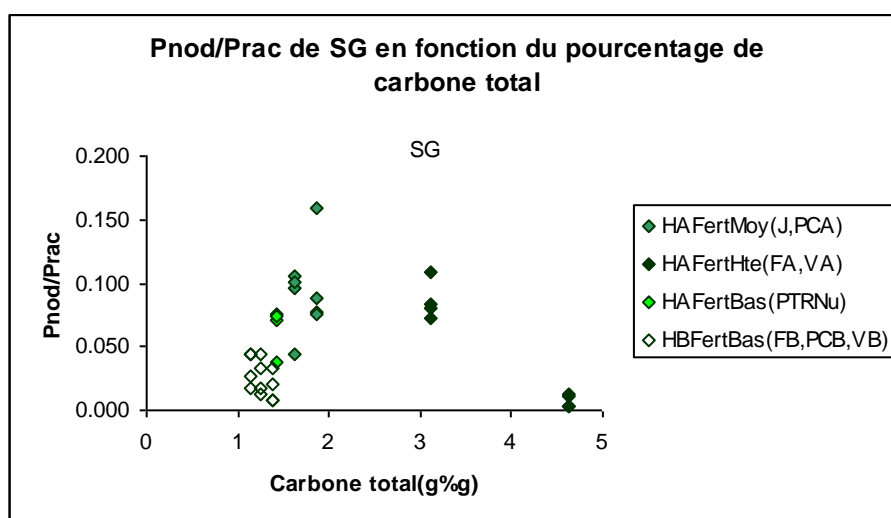


Figure 13. Pnod/Prac de SG en fonction du pourcentage de carbone total

La comparaison de la nodulation entre les trois espèces révèle plusieurs similarités :

- Pour les horizons A (**HA**), sur les sols les plus riches en matière organique (**FertHte : fertilité haute**), la nodulation est faible. C'est le cas de FA et VA qui ont une forte fertilité. En effet, ces sols, qui ont respectivement une teneur en carbone total de 4,63 et 3,12 g%g, ont six pots sur huit ayant un pourcentage nul de nodulation chez NW. Pour PP, quatre pots sur huit ont une nodulation inférieure à 0,1%. Pour SG, sept pots sur huit ont une nodulation inférieure à 0,1%.
- Pour J et PCA qui ont une fertilité moyenne (**FertMoy : fertilité moyenne** respectivement de 1,63 et 1,87 g%g), la nodulation est plus forte que sur les sols précédents. En effet, pour NW, le pourcentage de nodulation n'est jamais nul, sept pots sur huit ont une nodulation supérieure à 1% pour PP. Enfin, pour SG, quatre pots sur huit ont une nodulation supérieure à 0,1%.
- par contre PTRNu, qui est un horizon A, de faible fertilité, présente une faible nodulation
- pour les horizons B, qui ont une faible fertilité, il y a aussi une faible nodulation.

c. Analyse statistique qualitative

L'analyse du Ratio Pnod/Prac en fonction de l'espèce et du sol montre que l'effet de ces deux facteurs est hautement significatif (probabilité < 1% pour l'effet du sol et de 1,8% pour l'effet de l'espèce), par contre, l'interaction entre l'effet de ces deux facteurs est non significative (probabilité effet espèce*sol de 68%). Le R carré est égal à 50%, ainsi, 50,02% de la variabilité de la variable %Pnod/Prac est expliquée par la liaison avec les facteurs sol et espèce.

Les comparaisons deux à deux sur les niveaux de l'espèce montrent que le Pnod/Prac de PP est significativement supérieur à celui de SG. De plus, quelque soit l'espèce, le Pnod/Prac des plantes ayant poussé sur J et PCA est significativement supérieur à celui des plantes ayant poussé sur FA (Cf. annexe7).

Cela signifie que bien que le niveau de nodulation dépend fortement de l'espèce, mais que l'adaptation à des conditions de fertilité du sol reste néanmoins similaire pour ces trois légumineuses. Les résultats montrent qu'une moindre nodulation est observée sur le sol le plus fertile. Les conditions de plus faibles fertilités limitent aussi la nodulation (principalement les sols issus des horizons B). Les nodulations les plus fortes sont obtenues sur des sols issus d'horizon A de fertilité moyenne.

C. Evaluation des quantités d'azote absorbée et approche de la fixation symbiotique

Nous avons analysé la teneur en azote des parties aériennes des plantes et avons pu ainsi évaluer à partir des biomasses les quantités d'azote absorbées correspondantes.

Sur cette base nous avons ensuite tenté d'évaluer la fixation symbiotique de l'azote par bilan en microcosme en comparant plantes fixatrices et non fixatrice.

1. Absorption du concombre

L'absorption du concombre a été mesurée en fonction des différents sols (cf figure..).

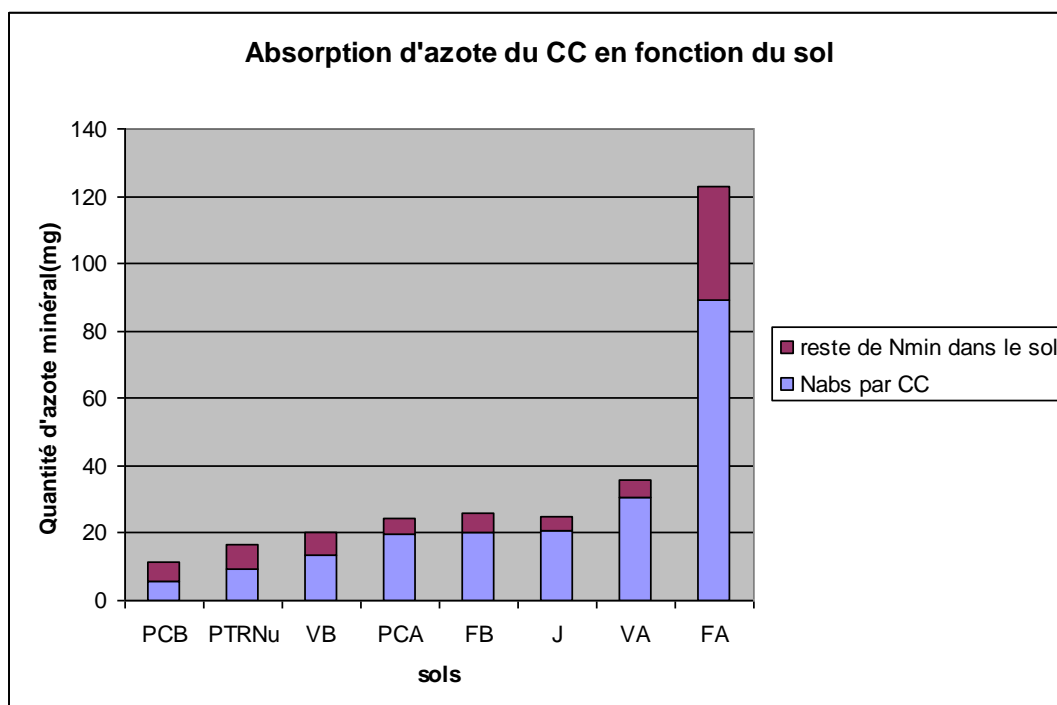


Figure14. Absorption d'azote du concombre en fonction du sol

On peut constater que les plus basses valeurs d'absorption correspondent aux sols les moins fertiles. Le raisonnement est le même pour les plus fortes valeurs d'absorption correspondant aux sols les plus fertiles.

A la fin de l'expérience, après que le concombre ait prélevé l'azote minéral qui lui est nécessaire, il reste de l'azote minéral dans le sol. Ces quantités restantes sont faibles comparativement à celles prélevées.

2. Réalisation d'un bilan de l'azote sur les pots de concombre

Le concombre n'est pas une espèce fixatrice d'azote, aussi les quantités absorbées par le concombre proviennent uniquement de l'azote minéral disponible dans le sol. Dans notre dispositif expérimental, il n'y a normalement pas eu de perte en azote dans la mesure où on a veillé à ne pas perdre d'eau par drainage, ainsi on peut estimer qu'il est possible de faire un bilan de l'azote pour chaque traitement expérimental. Sur cette base, nous avons cherché à estimer la minéralisation de l'azote du sol.

Le bilan pour un pot de sol maintenu proche de la capacité au champ est le suivant :

$$\text{FixN2PI}_{\text{leg}} = \Delta \text{nminSolPI}_{\text{leg}} + \text{NabsPI}_{\text{leg}} - \Delta \text{nminSolPI}_{\text{nf}} - \text{NabsPI}_{\text{nf}}$$

Sur la base du bilan, la minéralisation estimée est très faible, souvent nulle (ou même négative ce qui serait liée aux différentes erreurs analytiques). Cette estimation est donc difficilement utilisable pour la réalisation d'un bilan sur les légumineuses.

D'autre part, la fixation symbiotique par la méthode de l'abondance isotopique n'a pas non plus été employée car les délais d'analyse étaient trop longs par rapport à la durée du stage.

Aussi, pour avoir une approche de la fixation symbiotique des légumineuses nous avons opté pour une comparaison des quantités d'azote absorbées par les légumineuses par rapport aux quantités disponibles mises en évidence par le concombre en tenant compte de la quantité d'azote minéral résiduelle : cette quantité est donc obtenue en ajoutant l'azote absorbé par le concombre et la quantité d'azote que représente le reliquat d'azote minéral en fin d'expérimentation (cf. annexe).

D'après le raisonnement développé en **annexe 8**, la quantité d'azote fixé par une légumineuse (FixN2Leg) est égale à l'azote absorbé par cette légumineuse auquel on retranche la quantité finale d'azote minéral du sol où a poussé le concombre (NminSolfinCC) et la quantité d'azote absorbée par le concombre (NAbsCC):

$$\text{FixN2Leg} = \text{NAbsLeg} - \text{NAbsCC}$$

3. Absorption des Légumineuses

a. Analyse graphique

-Analyse de NW

Les quantités d'azote absorbées par NW ont été comparées à celle du concombre (cf figure..).

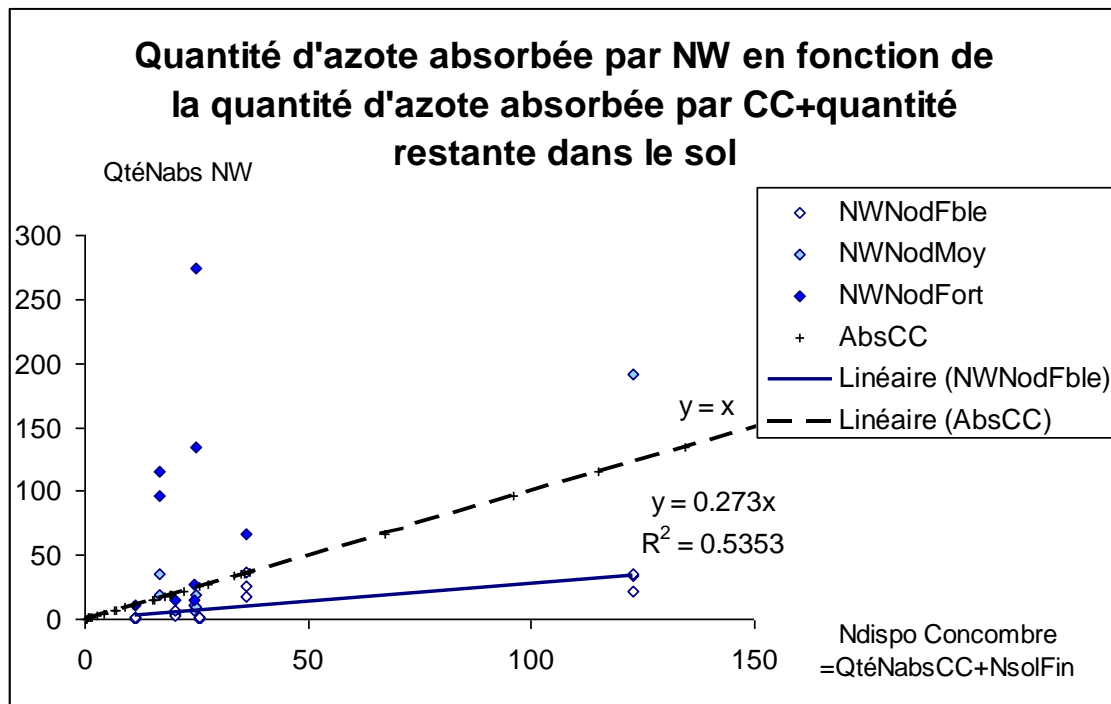


Figure 15.Quantité d'azote absorbée par NW en fonction de la quantité d'azote absorbée par CC+ quantité d'azote restante dans le sol

Les pots ont été séparés par leur capacité à noduler. L'analyse montre la quantité d'azote absorbée par les pots ayant une faible, moyenne et forte nodulation.

La droite d'équation $y=x$ signifie que les quantités d'azote absorbées par NW sont égales aux quantités d'azote absorbées par le concombre. Par conséquent, on peut émettre l'hypothèse que tout point se trouvant sur cette droite est un pot dont les plantes n'ont pas fixé l'azote de l'air. Plus un point est au-dessus de cette droite et plus les plantes de ce pot ont fixé.

Nous pouvons constater que :

- les pots de NW ayant une faible nodulation ont absorbé moins d'azote que le concombre
- les pots de NW ayant une forte nodulation ont absorbé plus d'azote que les pots de nodulation moyenne
- plusieurs pots ayant une forte nodulation ont absorbé plus d'azote que le concombre.

-Analyse de SG et PP

Les quantités d'azote absorbées par SG et PP ont été comparées à celle du concombre (cf figure..).

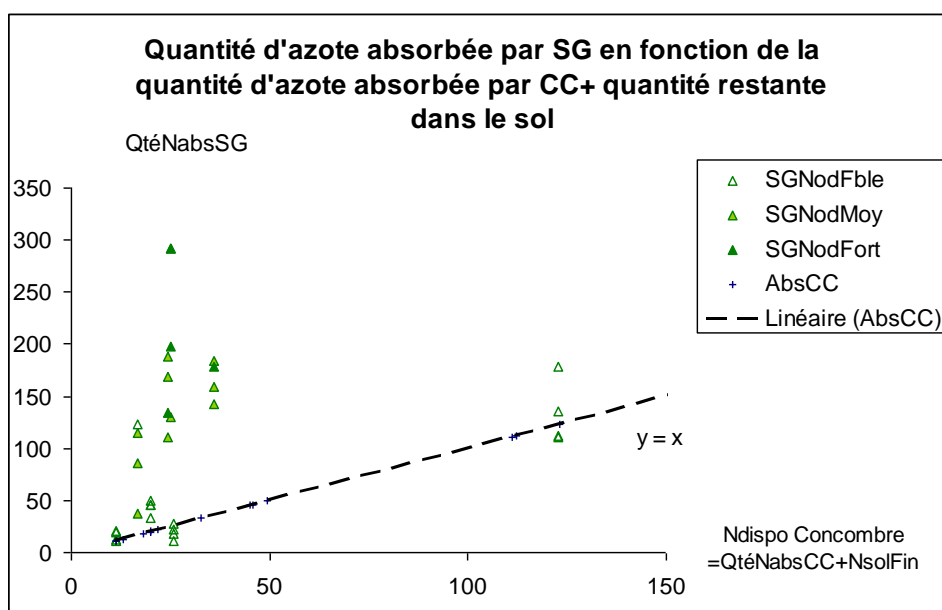


Figure 16. Quantité d'azote absorbée par SG en fonction de la quantité d'azote absorbée par CC+ quantité d'azote restante dans le sol

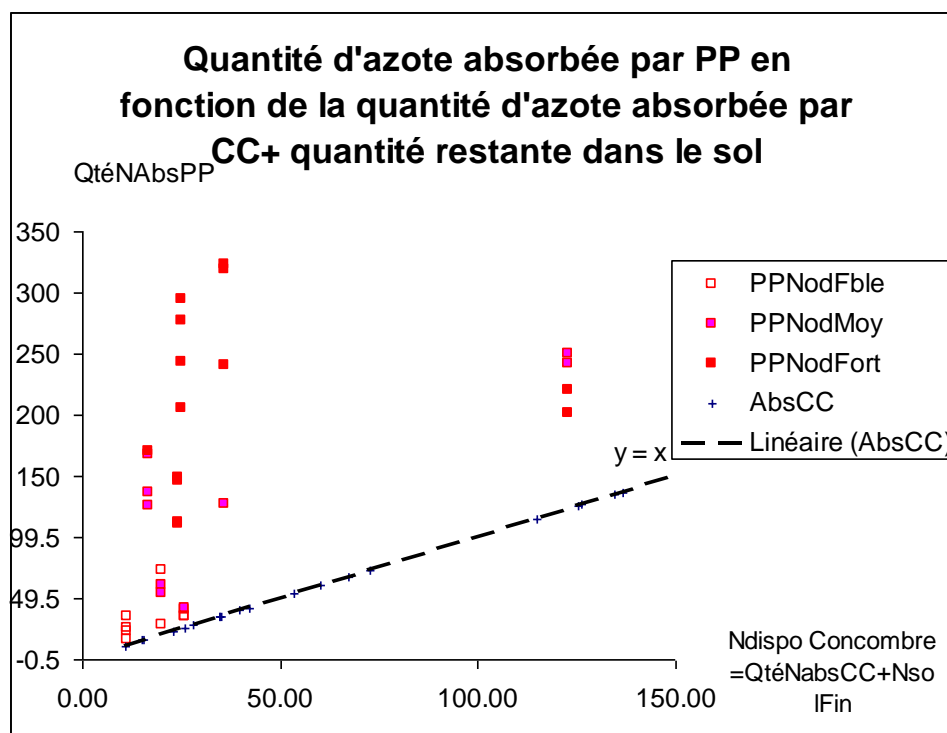


Figure 17. Quantité d'azote absorbée par PP en fonction de la quantité d'azote absorbée par CC+ quantité d'azote restante dans le sol

Nous pouvons constater que :

- les pots de SG et PP ayant une faible nodulation ont absorbé une quantité d'azote semblable à celle du concombre

- les pots de SG et PP ayant une forte nodulation ont absorbé plus d'azote que les pots de nodulation moyenne
- les pots ayant une nodulation moyenne et forte ont absorbé plus d'azote que le concombre.

De plus, la comparaison des trois graphiques montre que quand les trois espèces ont une forte nodulation, l'espèce qui a absorbé la plus grande quantité d'azote est PP.

b. Analyse statistique

-Analyse de variance Log(Azote absorbé par légumineuse) expliqué par Sol

L'analyse du logarithme de l'azote absorbé par NW, SG et PP en fonction du sol prouve que le sol a un effet hautement significatif. Le R carré nous montre qu'un fort pourcentage de la variabilité de la quantité d'azote absorbée est expliquée par le facteur sol (cf tableau..et annexe8).

Espèce	NW	PP	SG
p(sol)	0,000	0,000	0,000
Rcarré(%)	74,76	93,28	92,10

Tableau 5. Analyse de variance Log(Azote absorbé PP) expliqué par Sol

-Analyse de variance Log(Azote absorbé par légumineuse) expliqué par Sol et %Poids nodules/racines

En ajoutant à l'analyse précédente le facteur %poids nodules/Poids racines, le R carré est augmenté chez NW mais pas chez PP (cf tableau..et annexe.). Le pourcentage du poids de nodules par le poids racinaire contribue donc à expliquer la variabilité de l'azote absorbé par les plantes de NW.

Espèce	NW	PP	SG
p(sol)	0,000	0,000	0,000
P(%Poidsnod/Prac)	0,000	0.882	0,035
Rcarré(%)	88,53	93,28	0,000

Tableau 6. Analyse de variance Log(Azote absorbé PP) expliqué par Sol et pourcentage de nodulation

-Régression Log(Azote absorbé NW) expliqué par Sol et %Poids nodules/racines

Statistiquement, les résultats précédents montrent que le sol a un effet hautement significatif sur la quantité d'azote absorbée. Mais, cette analyse est qualitative. Pour la rendre quantitative, une régression linéaire a été réalisée. Le facteur qualitatif sol a été remplacé par le facteur quantitatif Log(NabsCC+RF). Ce dernier représente la quantité d'azote absorbée par le concombre à laquelle s'ajoute le reliquat final d'azote minéral du sol. Ce facteur correspond à la quantité d'azote qui était disponible dans le sol pour la croissance des légumineuses.

L'analyse montre que les facteurs NabsCC+RF et %poids nodules/Poids racines ont un effet hautement significatif sur la quantité d'azote absorbée par les légumineuses (cf tableau et annexe).

Espèce	NW	PP	SG
p(Log(NabsCC+RF))	0,001	0,001	0,000
P(%Poidsnod/Prac)	0,000	0,000	0,000
Rcarré(%)	56,1	60,7	60,6

Tableau 7. Régression Log(Azote absorbé NW) expliqué par Sol et %Poids nodules/racines

De plus, le R carré montre que plus de 50% de la variabilité de l'azote absorbé par les légumineuses est expliquée par la quantité d'azote absorbée par le concombre à laquelle s'ajoute le reliquat final d'azote minéral du sol.

V. Discussion

Les teneurs élevées d'azote et de carbone dépendent des apports fournis au sol

La teneur en carbone représente la teneur en matière organique. Etant donné que la teneur en matière organique d'un sol- donc sa teneur en azote organique- dépend généralement de la nature et des quantités de débris végétaux restitués (Chotte J-L, 1994), on comprend pourquoi FA possède les plus fortes teneurs (cf tableau 4). En forêt les quantités de débris végétaux qui vont constituer la litière sont importantes. La litière va donc alimenter l'horizon A de surface. Dans le cas de VA, ce sont les apports organiques qui se substituent aux débris végétaux. Pour PTRNu, c'est un horizon A dont la surface du sol est nue. Il ne reçoit donc aucun apport. C'est la raison pour laquelle ses valeurs de teneurs en carbone et en azote sont faibles.

Il en est de même pour les horizons B qui des horizons de profondeur, la litière ne les alimente pas directement.

Il existe un effet du sol sur la croissance des plantes

L'effet du sol sur la biomasse sèche des parties aériennes des plantes est significatif (figure 7 & tableau 4). Les biomasses des horizons A plus riches en matière organique, sont supérieures à celles des horizons B moins riches.

L'adaptation aux conditions de fertilité du sol est similaire pour les trois légumineuses concernant la nodulation

Le sol et l'espèce ont un effet sur la nodulation (cf. annexe 7). Peu importe l'espèce, elle nodulera peu sur des sols très fertiles ou très peu fertiles. A contrario, elle aura une meilleure nodulation sur des sols de fertilité moyenne.

Beaucoup d'azote et peu d'azote dans le sol altèrent la fixation symbiotique

Lorsque le sol a une grande fertilité (FA, VA) ou une faible fertilité (PTRNu, FB, VB, PCB) les plantes nodulent moins que celles ayant poussé sur J et PCA ayant une fertilité moyenne (figure 11, 12 et 13). De plus, les plantes ayant peu nodulé ont une absorption d'azote proche de celle du concombre (figure 15, 16 et 17). Le concombre étant une plante non fixatrice, on en déduit que les plantes ayant peu nodulé n'ont pas fixé beaucoup d'azote atmosphérique. On en déduit aussi que les plantes ayant poussé sur un sol de faible ou forte fertilité n'ont pas fixé beaucoup d'azote atmosphérique. Un effet dose azote est donc observé. La plante fixe de moins en moins d'azote atmosphérique quand le sol est de plus en plus riche en azote, ce qui est confirmé par Dakora and Keya, 1996. Selon eux, les plants fertilisés d'arachide ont une performance symbiotique altérée par rapport au plant non fertilisé. Mais d'après Bollner et Nosberger, 1987 cité dans Ledgard et Steele, 1992, l'application modérée de fertilisant azoté (50kg N/ha) peut avoir des effets relativement faibles sur la quantité d'azote

atmosphérique fixé. La confirmation de ce phénomène est un résultat important en terme d'utilisation des légumineuses testées dans les systèmes de culture bananiers.

De plus, les sols ayant une grande teneur en azote minéral tels que FA et VA pourraient altérer la symbiose entre *Rhizobium* et légumineuses. En effet, les effets négatifs provoqués par le nitrate sur l'établissement de la symbiose et son fonctionnement sont largement documentés (Stephens et Neyra, 1983 ; Drevon et al., 1988 ; Streeter, 1988 cité dans Obaton M. , 1992). L'ion nitrate perturbe la pénétration des *Rhizobium* dans le poil absorbant. Lorsque les nodosités sont formées l'augmentation de la teneur en nitrates interrompt le développement des nodosités de type indéterminé, c'est-à-dire le fonctionnement de leur méristème. Enfin, lorsque la nodosité est active, le nitrate entrave les mécanismes biochimiques de fixation de l'azote à différents niveaux.

Une quantité moyenne d'azote dans le sol favorise la fixation symbiotique

Lorsque le sol a une fertilité moyenne (J, PCA), les plantes nodulent plus que celles ayant poussé sur l'ensemble des autres sols (figure 8,9 et 10). De plus, plus les plantes ont nodulé et plus elles ont absorbé une quantité d'azote supérieure à celle du concombre (figure 15, 16 et 17). On en déduit que les plantes ayant fortement nodulé ont fixé beaucoup d'azote atmosphérique et qu'elles ont poussé sur un sol ayant une fertilité moyenne.

L'espèce la plus performante en terme de fixation symbiotique est *Pueraria phaseoloides*

Cette espèce est déjà utilisée en essai en bananeraie et fournit des résultats convaincants mais l'utilisation de *Neonotonia wightii*, par exemple, peut être intéressante. En effet, malgré une implantation difficile et la nécessité d'un désherbage manuel, le couvert s'est bien développé, il se maintient bien, ne fait pas trop de biomasse et ne concurrence donc pas trop le bananier. En outre, il est pur, probablement en raison d'un effet allélopathique dépressif sur la croissance des graminées, et n'est pas hôte des nématodes du bananier (Laurens, 2008).

Conduite de la plante de couverture pour augmenter la fixation symbiotique.

La tonte d'une couverture vivante de légumineuses est moyen d'entretenir le couvert qui serait favorable à l'accroissement de la fixation et n'entraînerait pas une augmentation de la compétition. La tonte de trèfle blanc permet d'augmenter la fixation symbiotique de 33% en Argentine et 10% en Nouvelle Zélande. (Brock et al, 1989 cité dans Ledgard et Steele, 1992).

Une biologie différente dans les horizons B en comparaison aux horizons A pourrait expliquer les faibles croissance et fixation des plantes ayant poussé sur les horizons B

Les horizons B ont une faible fertilité, une faible croissance des plantes et une faible fixation symbiotique (figure 7, 12, 13 et 14). Il faut noter qu'à l'issue des deux mois de croissance, beaucoup de plantes se sont peu ou pas développées dans les pots dont les sols étaient des horizons B.

PTRNu est un sol ayant une faible fertilité mais les plantes se sont développées correctement. On ne peut pas dire que sur PTRNu les plantes ont compensé les faibles teneurs en azote par de la fixation symbiotique car les résultats montrent le contraire. Par conséquent, sur PTRNu, même avec peu de fixation symbiotique et une faible fertilité, il y eu une réponse au niveau de la croissance des plantes pour tous les pots. Ce qui n'est pas le cas des horizons B. Si leur biologie est différente de celle des horizons A, les différences de croissance obtenues ne seraient pas uniquement liées à la richesse du sol. Elles le seraient à la biologie et peut-être la chimie des sols qui sont différentes des horizons A et qui pourraient gêner la croissance des plantes.

Amélioration de l'expérience

Si l'on devait recommencer cette expérience, il serait intéressant :

- d'augmenter le nombre de répétitions des pots ayant un sol nu afin que les résultats de minéralisation soient meilleurs. Si l'on augmente le nombre de répétitions des pots « sols nu », on pourrait prendre moins de sols car certains d'entre eux avaient des caractéristiques semblables.

- Il faudrait aussi augmenter la durée de l'expérience afin d'observer une évolution significative de la minéralisation au cours de l'expérience.

VI. Conclusion et perspectives

Les plantes de couverture sont de plus en plus utilisées en agriculture afin de protéger les sols ou encore pour limiter la propagation des adventices dans les cultures. En bananeraie, l'établissement d'une couverture vivante permanente est une solution pour réduire l'utilisation des herbicides. Mais leur utilisation pose le problème de la concurrence avec la culture et en particulier la concurrence azotée.

Les légumineuses, par leur capacité à fixer l'azote atmosphérique pourraient générer moins de concurrence. Les résultats ont montré qu'il existe un effet du sol sur la croissance et la nodulation des plantes. En se basant sur les quantités d'azote absorbées pendant deux mois, les trois espèces ont montré de meilleures capacités de fixation d'azote lorsque la fertilité du sol n'est ni trop élevée ni trop basse. L'espèce qui s'est révélée être la plus performante est *Pueraria phaseoloides*.

Les perspectives d'utilisation des résultats de ce stage sur le terrain sont diverses. En effet, si un sol a une fertilité moyenne c'est-à-dire proche de celle des terrains J et PCA, on peut s'attendre à ce que la légumineuse fixe beaucoup d'azote, ce qui limitera la concurrence avec le bananier.

D'autre part, en bananeraie, il semble optimal de placer la légumineuse dans le grand inter-rang, en réalisant une fertilisation localisée au pied des bananiers. En effet l'implantation sur un inter-rang non fertilisé, devrait maximiser la fixation symbiotique de la légumineuse. Ceci devrait permettre à la fois de ne pas accroître les besoins en fertilisants azotés de l'agrosystème et de ne pas réduire sensiblement la productivité de la culture.

Bibliographie

- Ozier-Lafontaine H., 2009. Cours sur le fonctionnement global de l'écosystème cultivé.
- AGRESTE ,2003. La statistique agricole. Memento agricole. Résultats 2003 Guadeloupe.

- DIREN, 2006. La qualité des cours d'eau en Martinique.
- Lavigne A., 2008. Etude de la structure des réseaux trophiques des bananeraies antillaises par approche isotopique. Potentialités de régulation des bioagresseurs. Agrocampus Ouest, Angers.
- Campbell et al., 1995. Biologie. De Boek Université, p. 725-729.
- Bowen W.T., Jones J.W., Carsky R.J., Quintana J.O., 1993. Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-Maize following legume green manure incorporation. Agron.J.85 : 153-159.
- Février A., 2009. Evaluation de la fixation symbiotique d'azote par des légumineuses tropicales utilisables en plantes de couverture. Université de Rennes, CIRAD, PRAM
- Bonzi M., 2002. Evaluation et déterminisme du bilan de l'azote en sols cultivés du centre Burkina Faso : Etude par taçage isotopique ¹⁵N au cours d'essais en station et en milieu paysan. Doctorat Sciences Agronomiques INLP. Ensaia. Nancy, p. 136.
- Howard S B, Ong Ck, Rao MR, Mathuva M and Black C, 1995. The partitioning of light and water in Leucaena-maize agroforestry systems. In Ecophysiology of tropical intercropping. Eds H sinoquet and P Cruz, p. 123-136. INRA, Paris.
- Colmet-Daage F., Lagache P., 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. Cah. ORSTOM, sér Pédol. III, 2, 91-122

- Lassourdière A, 2007. Le bananier et sa culture. Edition Quae, pp383.
- Thieuleux L., 2006. Biodisponibilité de l'azote en culture bananière sur ferrisol. Université des Antilles et de la Guyane, CIRAD, INRA, PRAM.
- Yvon Dommergues, Emile Duhoux, Hoang G. Diem, 1998, Les arbres fixateurs d'azote, p.121-J.-L. Chotte, C. Feller, M.-J. Vallony, B. Nicolardot, 1994. Disponibilité de l'azote dans les sols cultivés des Petites Antilles. Agriculture et développement n° 4-Décembre 1994
- Dakora F.D. and Keya S.O., 1996. Contribution of legume nitrogen fixation to sustainable agriculture in sub- saharian Africa. Soil biology biochemistry volume 29. No.5/6, pp.809- 817.
- Ledgard S.F. and Steele K.W., 1992. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. Plant and soil 141:137-153.
- Obaton M. , 1992. Biological Nitrogen Fixation and sustainability of tropical agriculture. Edité par Mulongoy K., Gueye M. et Spencer D.S.C. Wiley-Sayce Co-Publication p. 61

Abréviations

Espèces

NW: *Neonotonia wightii*
 SG: *Stylosanthes guianensis*
 PP: *Pueraria phaseoloides*
 CC: *Cucumis sativus*

Sols

VA: verger biologique horizon A
 VB: verger biologique horizon B
 FA: forêt horizon A
 FB: forêt horizon B
 PCA: pomme complément horizon A

PCB: pomme complément horizon B

J: jachère Ponterre 2

PTRNu: Ponterre Haut bloc 4 nu

Annexe 1 : préparation des pots

La décision de mettre 1,25 kg de sol sec dans un pot a été prise afin que quelque soit l'humidité du sol, on pourrait remplir suffisamment les pots. Cette quantité de sol sec a été calculée en utilisant le sol le plus humide. En effet, l'humidité du sol « pomme complément horizon A » était de 53,99%. Un pot a été totalement rempli avec ce sol et le poids obtenu nous a permis de déduire la quantité de sol sec maximale que l'on pourrait mettre dans ce pot. Ensuite, la valeur 1,25 kg, qui se trouve être légèrement inférieure à la valeur maximale, a été choisie arbitrairement.

Le poids des pots contenant du sol humide a été déterminé selon l'équation suivante :

x étant le poids du pot et H étant l'humidité du sol,

$$x = 1,25 + 1,25 * H$$

Cependant, le sol « verger biologique horizon B » a été accidentellement arrosé. Son humidité a donc augmenté. Il fallait donc refaire une détermination de l'humidité résiduelle de ce sol pour savoir quelle quantité de sol humide que l'on devrait mettre dans le pot. Par manque de temps, on a décidé de mettre 2 kg de terre par pot pour ce sol. A l'aide de l'humidité obtenue, le calcul nous a indiqué que l'on a introduit **1,24 kg** de sol sec dans un pot de verger biologique HB.

On a obtenu le tableau suivant :

Type de sol	Humidité(%)	Poids du pot(kg)
Jachère	43.98	1.8
Verger biologique HA	38.16	1.73
Verger biologique HB	60.80	2
Pomme complément HA	33.51	1.67
Pomme complément HB	53.99	1.92
Forêt HA	37.72	1.72
Forêt HB	33.85	1.67
Ponterre Haut Bloc 4 Nu	29.77	1.62

Annexe 2 : amendements

Le pH des huit sols a été déterminé. On a voulu établir un pH de 5,7 dans les sols en dessous de cette valeur. Le tableau ci-dessous indique la valeur du pH des sols ainsi que les unités de pH à rajouter.

Sols	pH	Unités de pH à rajouter	pH final
Verger biologique HA	5.98	0	5.7
Forêt HA	5.29	0.5	5.65
Jachère	4.83	1	5.67
Pomme complément HA	4.5	1	4.92
Verger biologique HB	5.79	0	5.93
Forêt HB	4.68	1	5.97
Pomme complément HB	4.69	1	6.06
Ponterre Haut bloc 4 nu HA	6.194	0	6.46

Afin de connaître la quantité d'amendement calcique qui doit être mise dans les sols, une courbe d'évolution du pH en fonction du chaulage a été employée :

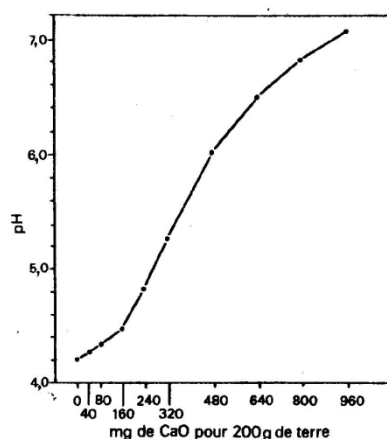


FIG. 1 * EVOLUTION DU pH EN FONCTION DU CHAULAGE.

On constate que si un sol a un pH de 4.8 (c'est le cas du sol « jachère »), pour obtenir une unité de pH en plus il faut rajouter 160 mg de CaO pour 200g de terre. Si un sol a un pH égal à 5.2 (forêt HA), pour avoir une demi-unité de pH supplémentaire, il faut rajouter 80mg de CaO.

En conséquence, une expérience a été menée dans le but d'ajuster le pH de certains sols : des pots contenant 70g de terre sèche correspondant aux huit sols ont reçu des doses croissantes de dolomie. Le graphique indique qu'il faut 80 mg de CaO pour avoir 0.5 unité de pH pour 200g de terre. Aussi, si l'on raisonne avec 70g de terre, il faut donc 28mg de CaO. On a donc ajouté aux sols concernés 14,28,56 et 84mg de CaO. Les résultats sont exprimés dans le tableau ci-dessous :

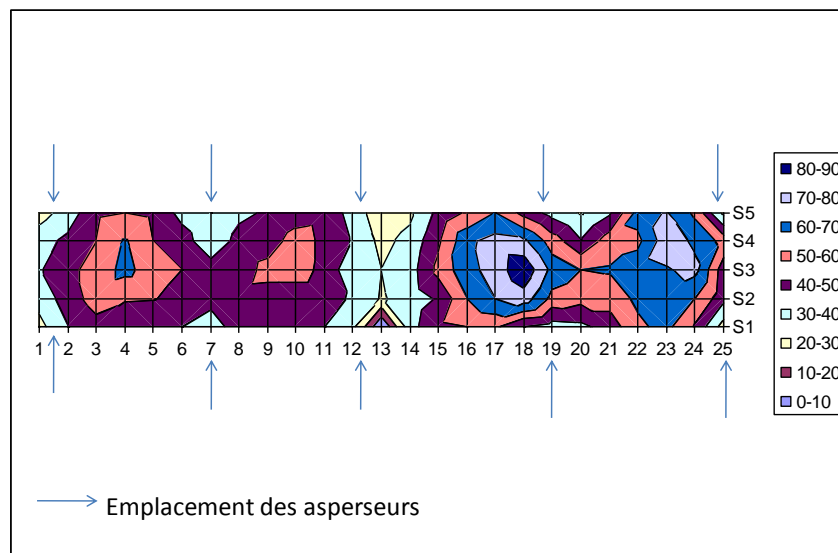
Sols (pots de 70g)	CaO ajouté(mg)	pH	pH remesuré
Verger biologique HA	0	6.258	
Forêt HA	0	5.761	
	14	6.291	6.185
	28	6.275	6.454

Jachère	0	5.875	5.945
	14	5.888	5.905
	28	5.870	6.080
	56	6.024	
	84	6.279	
Pomme complément HA	0	5.039	
	14	5.095	
	28	5.253	
	56	5.380	
	84	5.747	
Verger biologique HB	0	5.774	
Forêt HB	0	5.643	4.995
	14	5.635	5.783
	28	5.84	
	56	6.207	
	84	6.325	
Pomme complément HB	0	5.433	5.566
	14	5.511	5.600
	28	5.542	5.604
	56	5.547	5.954
	84	5.828	
Ponterre Haut bloc 4 nu HA	0	6.194	

Le pH a été mesuré à nouveau lorsqu'il y avait des incompréhensions. Et, à partir des valeurs de pH obtenues et reportées dans les deux tableaux ci-dessus, la quantité de CaO que l'on introduirait dans les sols a été choisie. Elle correspond au surlignage vert. Cette quantité a été calculée pour 70g de terre sèche. La conversion a donc été faite pour les pots contenant 1.25kg de terre sèche dans lesquels nos plantes ont poussé.

Annexe 3 :contrôle de l'arrosage automatique

Le graphique ci-dessous représente la répartition des précipitations sur les tables où étaient disposés les dessous de pots. S1 à S5 correspondent aux colonnes de pots. Les nombres 1 à 12 correspondent aux lignes de pots de la première table, les lignes 13 à 25 indiquent l'emplacement de la deuxième table. La légende montre un figuré de couleur indiquant une tranche de précipitation exprimée en ml. On constate qu'au niveau de l'emplacement des asperseurs, les quantités d'eau contenues dans les dessous de pots sont relativement faibles. En revanche, c'est au centre des tables que l'on obtient les valeurs maximales.





Annexe 4 : évaluation de la fixation symbiotique

Evaluation de la fixation symbiotique par bilan de l'azote en microcosme en fonction du niveau de minéralisation nette du sol.

Le bilan pour un pot de sol maintenu proche de la capacité au champ est le suivant :

$$N_{\text{minSol}_{\text{départ}}} + \text{MinMOS}_{\text{nette}} + \text{FixN2Pl} = N_{\text{minSol}_{\text{fin}}} + \text{NabsPl} + \text{Less} (=0) + \text{Volat} (=0)$$

$$N_{\text{minSol}_{\text{départ}}} + \text{MinMOS}_{\text{nette}} + \text{FixN2Pl} = N_{\text{minSol}_{\text{fin}}} + \text{NabsPl}$$

Pour une plante non symbiotique (ex concombre ; Pl_{nf}) : $\text{Fixat}^{\circ}\text{N2}=0$

$$N_{\text{minSol}_{\text{départ}}} + \text{MinMOS}_{\text{nette}} = N_{\text{minSol}_{\text{fin}}} + \text{NabsPl}_{\text{nf}}$$

On peut déduire de cela

$$\begin{aligned} \text{MinMOS}_{\text{nette}} &= N_{\text{minSol}_{\text{fin}}} - N_{\text{minSol}_{\text{départ}}} + \text{NabsPl}_{\text{nf}} \\ &= \Delta n_{\text{minSolPl}}_{\text{nf}} + \text{NabsPl}_{\text{nf}} \end{aligned}$$

Pour une plante symbiotique (ex Pueraria ; Pl_{leg}) :

On cherche à déterminer $\text{FixN2Pl}_{\text{leg}}$

$$N_{\text{minSol}_{\text{départ}}} + \text{MinMOS}_{\text{nette}} + \text{FixN2Pl}_{\text{leg}} = N_{\text{minSol}_{\text{fin}}} + \text{NabsPl}_{\text{leg}}$$

On peut déduire de cela

$$\begin{aligned} \text{FixN2Pl}_{\text{leg}} &= N_{\text{minSol}_{\text{fin}}} - N_{\text{minSol}_{\text{départ}}} + \text{NabsPl}_{\text{leg}} - \text{MinMOS}_{\text{nette}} \\ &= \Delta n_{\text{minSolPl}}_{\text{leg}} + \text{NabsPl}_{\text{leg}} - \text{MinMOS}_{\text{nette}} \end{aligned}$$

Or $\text{MinMOS}_{\text{nette}}$ ne dépend pas de la plante cultivée et peut être estimé à partir des mesures sur plantes non fixatrices. En reprenant pour la minéralisation nette l'estimation obtenue à partir de la plante non fixatrice on a :

$$\begin{aligned} \text{FixN2Pl}_{\text{leg}} &= \Delta n_{\text{minSolPl}}_{\text{leg}} + \text{NabsPl}_{\text{leg}} - \text{MinMOS}_{\text{nette}} \\ &= \Delta n_{\text{minSolPl}}_{\text{leg}} + \text{NabsPl}_{\text{leg}} - (\Delta n_{\text{minSolPl}}_{\text{nf}} + \text{NabsPl}_{\text{nf}}) \\ &= \Delta n_{\text{minSolPl}}_{\text{leg}} + \text{NabsPl}_{\text{leg}} - \Delta n_{\text{minSolPl}}_{\text{nf}} - \text{NabsPl}_{\text{nf}} \end{aligned}$$

Où $-N_{\text{minSol}_{\text{départ}}}$ est l'azote minéral du sol au début de notre expérience c'est-à-dire lorsque l'on a mis la terre dans le pot

- $N_{\text{minSol}_{\text{fin}}}$ est l'azote minéral du sol à la fin de l'expérience
- $\text{MinMOS}_{\text{nette}}$ est la minéralisation nette de la matière organique
- FixN2Pl est l'azote atmosphérique fixé par la plante
- $\text{FixN2Pl}_{\text{leg}}$ est l'azote atmosphérique fixé par la plante légumineuse
- NabsPl est l'azote absorbé par la plante
- $\text{NabsPl}_{\text{nf}}$ est l'azote absorbé par la plante non fixatrice
- $\text{NabsPl}_{\text{leg}}$ est l'azote absorbé par la plante fixatrice
- Less est le lessivage
- Volat est la volatilisation
- $\Delta n_{\text{minSolPl}_{\text{leg}}}$ est la différence $N_{\text{minSol}_{\text{fin}}} - N_{\text{minSol}_{\text{départ}}}$ pour la légumineuse étudiée
- $\Delta n_{\text{minSolPl}_{\text{nf}}}$ est la différence $N_{\text{minSol}_{\text{fin}}} - N_{\text{minSol}_{\text{départ}}}$ pour une plante non fixatrice.

Annexe 5 : Psec en fonction du sol et de l'espèce

Diagrammes de valeurs résiduelles pour Pbsec

Modèle linéaire général : Log(PSec) en fonction de sol; espèce

Facteur Type Niveaux Valeurs

sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

espèce fixe 4 CC; NW; PP; SG

Analyse de la variance pour Log(PSec), avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

SomCar

Source	DL	SomCar	seq	ajust	CM	ajust	F	P
sol	7	15,8459	16,9018	2,4145	34,09	0,000		
espèce	3	16,5981	16,3454	5,4485	76,92	0,000		
sol*espèce	21	6,1742	6,1742	0,2940	4,15	0,000		
Erreur	108	7,6495	7,6495	0,0708				
Total	139	46,2676						

S = 0,266136 **R carré = 83,47 %** R carré (ajust) = 78,72 %

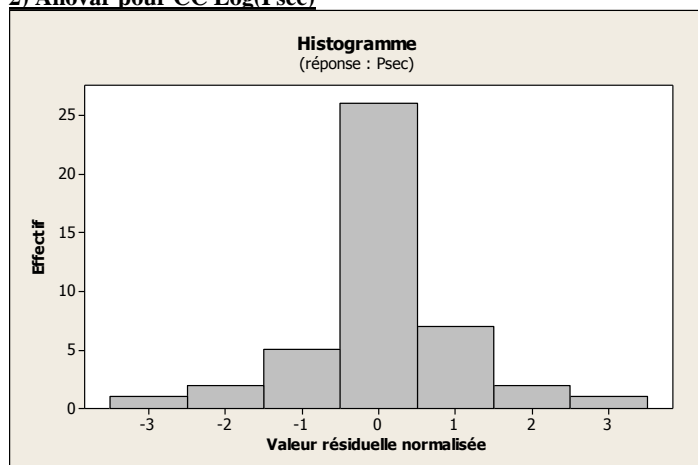
Observations aberrantes pour Log(PSec)

Observation	Valeur		Valeur		
	Log(Psec)	ajustée	Ajust ErT	résiduelle normalisée	
1	0,96848	0,12273	0,13307	0,84575	3,67 R
3	-0,35655	0,12273	0,13307	-0,47928	-2,08 R
18	-1,82391	-1,17720	0,13307	-0,64671	-2,81 R
19	0,19866	-1,17720	0,13307	1,37586	5,97 R
36	-0,25181	0,42271	0,13307	-0,67453	-2,93 R
37	1,07846	0,42271	0,13307	0,65574	2,85 R
72	-1,69897	-1,12646	0,13307	-0,57251	-2,48 R
74	-0,28400	-1,12646	0,13307	0,84246	3,66 R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Annexe 6 : Psec des espèces en fonction du sol

2) Anovar pour CC Log(Psec)



Résultats pour : Feuille de travail 2

Modèle linéaire général : Psec en fonction de sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour Psec, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

SomCar

Source DL SomCar seq ajust CM ajust F P

sol 7 65,8945 65,8945 9,4135 95,73 0,000

Erreur 36 3,5399 3,5399 0,0983

Total 43 69,4345

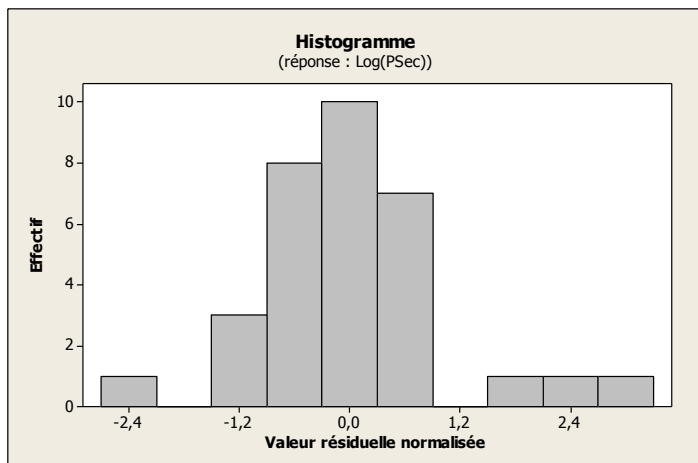
S = 0,313578 R carré = 94,90 % R carré (ajust) = 93,91 %

Observations aberrantes pour Psec

Observation	Valeur		Valeur		
	Psec	ajustée	Ajust ErT	résiduelle normalisée	
1	3,73000	4,65800	0,14024	-0,92800	-3,31 R
5	5,57000	4,65800	0,14024	0,91200	3,25 R
34	2,13000	1,48800	0,14024	0,64200	2,29 R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

2) Anovar pour PP Log(Psec)



Modèle linéaire général : Log(PSec) en fonction de sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour Log(PSec), avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

SomCar

Source DL SomCar séq ajust CM ajust F P

sol 7 3,10013 3,10013 0,44288 31,51 0,000

Erreur 24 0,33728 0,33728 0,01405

Total 31 3,43741

S = 0,118547 R carré = 90,19 % R carré (ajust) = 87,33 %

Observations aberrantes pour Log(PSec)

	Valeur	Valeur résiduelle
Observation	Log(PSec) ajustée	Ajust ErT résiduelle normalisée
10	1,29092 1,03568 0,05927	0,25525 2,49 R
17	-0,05061 0,18276 0,05927	-0,23337 -2,27 R
20	0,48995 0,18276 0,05927	0,30719 2,99 R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Modèle linéaire général : Log(Psec) en fonction de Sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour LogNabs, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

SomCar

Source DL SomCar séq ajust CM ajust F P

%Nod/Prac 1 2,05250 0,00032 0,00032 0,02 0,882

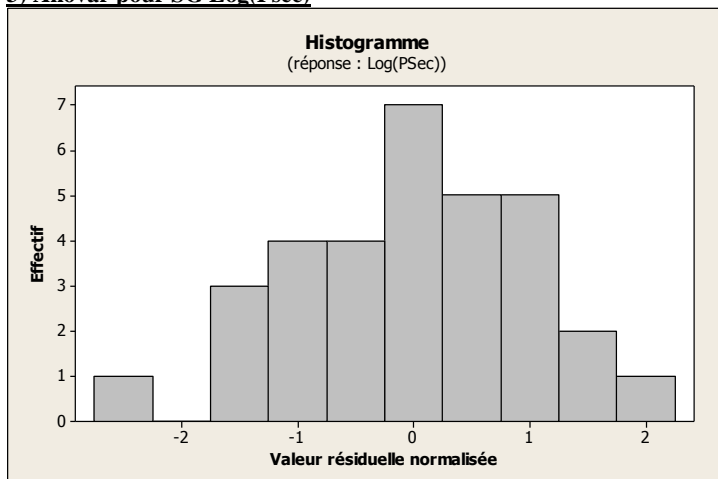
Sol 7 2,46660 2,46660 0,35237 24,90 0,000

Erreur 23 0,32547 0,32547 0,01415

Total 31 4,84457

S = 0,118958 R carré = 93,28 % R carré (ajust) = 90,94 %

3) Anovar pour SG Log(Psec)



Modèle linéaire général : Log(PSec) en fonction de sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour Log(PSec), avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

SomCar

Source DL SomCar seq ajust CM ajust F P

sol 7 4,21377 4,21377 0,60197 39,91 0,000

Erreur 24 0,36196 0,36196 0,01508

Total 31 4,57573

S = 0,122808 R carré = 92,09 % R carré (ajust) = 89,78 %

Observations aberrantes pour Log(PSec)

Valeur

Valeur

Valeur résiduelle

Observation Log(PSec) ajustée Ajust ErT résiduelle normalisée

12 1,00647 0,79101 0,06140 0,21545 2,03 R

23 0,16435 0,44393 0,06140 -0,27958 -2,63 R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Modèle linéaire général : LogPSec en fonction de Sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour LogPSec, avec utilisation de la somme des carrés séquentielle pour les tests

SomCar

Source DL SomCar seq ajust CM seq F P

%Pnod/Prac 1 1,01971 0,07746 1,01971 82,44 0,000

Sol 7 3,27153 3,27153 0,46736 37,78 0,000

Erreur 23 0,28450 0,28450 0,01237

Total 31 4,57573

S = 0,111218 R carré = 93,78 % R carré (ajust) = 91,62 %

Terme Coeff Coef ErT T P

Constante 0,55272 0,06030 9,17 0,000

%Pnod/Prac -2,706 1,081 -2,50 0,020

Observations aberrantes pour LogPSec

Valeur

Valeur

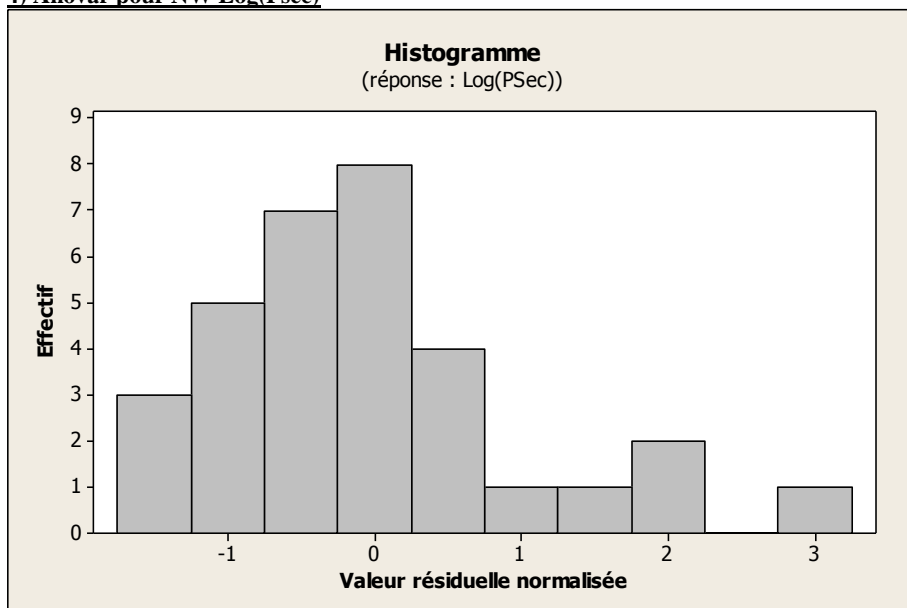
Valeur résiduelle

Observation LogPSec ajustée Ajust ErT résiduelle normalisée

15 0,16435 0,41465 0,05683 -0,25030 -2,62 R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

4) Anovar pour NW Log(Psec)



Modèle linéaire général : Log(PSec) en fonction de sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour Log(PSec), avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

SomCar

Source DL SomCar seq ajust CM ajust F P

sol 7 11,3072 11,3072 1,6153 5,87 0,000

Erreur 24 6,6030 6,6030 0,2751

Total 31 17,9103

S = 0,524526 R carré = **63,13 %** R carré (ajust) = 52,38 %

Observations aberrantes pour Log(PSec)

Valeur

Observation	Valeur	Log(PSec) ajustée	Ajust ErT	Valeur résiduelle normalisée
6	0,19866	-1,17720	0,26226	1,37586

3,03 R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Modèle linéaire général : LogPsec en fonction de Sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour LogPsec, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

SomCar

Source DL SomCar seq ajust CM ajust F P

%Pnod/Prac 1 5,9053 1,7869 1,7869 17,15 0,000

Sol 7 9,4972 9,4972 1,3567 13,02 0,000

Erreur 22 2,2922 2,2922 0,1042

Total 30 17,6948

S = 0,322787 R carré = **87,05 %** R carré (ajust) = 82,34 %

Terme Coeff Coef ErT T P

Constante -0,50659 0,07429 -6,82 0,000

%Pnod/Prac 3,3643 0,8124 4,14 0,000

Observations aberrantes pour LogPsec

Valeur

Observation	Valeur	LogPsec ajustée	Ajust ErT	Valeur résiduelle normalisée
22	0,96848	0,27066	0,16530	0,69782

2,52 R

27 1,07846 0,50920 0,16274 0,56926 2,04 R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Annexe7 : Statistique sur la nodulation

Modèle linéaire général : %Pnod/Prac en fonction de Esp; Sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

Esp fixe 3 NW; PP; SG

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour %Pnod/Prac, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
Esp	2	0,022935	0,022935	0,011468	4,23	0,018
Sol	7	0,142355	0,142355	0,020336	7,51	0,000
Esp*Sol	14	0,029943	0,029943	0,002139	0,79	0,677
Erreur	72	0,195076	0,195076	0,002709		
Total	95	0,390309				

S = 0,0520518 **R carré = 50,02 %** R carré (ajust) = 34,05 %

Observations aberrantes pour %Pnod/Prac

Observation	Valeur		Valeur résiduelle		normalisée
	%Pnod/Prac	ajustée	Ajust ErT	résiduelle	
5	0,291379	0,135456	0,026026	0,155923	3,46 R
6	0,039175	0,135456	0,026026	-0,096281	-2,14 R
13	0,207220	0,087615	0,026026	0,119605	2,65 R
19	0,255803	0,063951	0,026026	0,191852	4,26 R
24	0,153694	0,038423	0,026026	0,115270	2,56 R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Intervalles de confiance simultanés de Tukey = 95,0 %

Variable de réponse %Pnod/Prac

Toutes les comparaisons deux à deux sur les niveaux de Esp

Esp = NW soustrait de :

Esp	Inférieur	Centré	Supérieur	-----+-----+-----+-----
PP	-0,00175	0,029353	0,06045	(-----*-----)
SG	-0,03713	-0,006033	0,02507	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----
				-0,035 0,000 0,035

Esp = PP soustrait de :

Esp	Inférieur	Centré	Supérieur	-----+-----+-----+-----
SG	-0,06649	-0,03539	-0,004285	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----
				-0,035 0,000 0,035

Tests de simultanéité de Tukey

Variable de réponse %Pnod/Prac

Toutes les comparaisons deux à deux sur les niveaux de Esp

Esp = NW soustrait de :

Erreur type		Valeur de	
Différence	de la	Valeur de T	p ajustée
Esp des moyennes	différence		
PP	0,029353	0,01301	2,2557 0,0688
SG	-0,006033	0,01301	-0,4636 0,8885

Esp = PP soustrait de :

Erreur type		Valeur de	
Différence	de la	Valeur de T	p ajustée
Esp des moyennes	différence		
SG	-0,03539	0,01301	-2,719 0,0221

Modèle linéaire général : %Pnod/Prac en fonction de Esp; Sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

Esp fixe 3 NW; PP; SG

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour %Pnod/Prac, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source DL SomCar séq SomCar ajust CM ajust F P

Esp 2 0,022935 0,022935 0,011468 4,23 0,018

Sol 7 0,142355 0,142355 0,020336 7,51 0,000

Esp*Sol 14 0,029943 0,029943 0,002139 0,79 0,677

Erreur 72 0,195076 0,195076 0,002709

Total 95 0,390309

S = 0,0520518 R carré = 50,02 % R carré (ajust) = 34,05 %

Observations aberrantes pour %Pnod/Prac

		Valeur		Valeur	
		Valeur		Valeur résiduelle	
Observation	%Pnod/Prac	ajustée	Ajust	ErT	résiduelle normalisée
5	0,291379	0,135456	0,026026	0,155923	3,46 R
6	0,039175	0,135456	0,026026	-0,096281	-2,14 R
13	0,207220	0,087615	0,026026	0,119605	2,65 R
19	0,255803	0,063951	0,026026	0,191852	4,26 R
24	0,153694	0,038423	0,026026	0,115270	2,56 R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Intervalles de confiance simultanés de Dunnett = 95,0 %

Variable de réponse %Pnod/Prac

Comparaisons avec niveau de contrôle

Sol = FA soustrait de :

Sol	Inférieur	Centré	Supérieur	-----+-----+-----+-----
FB	-0,07582	-0,01892	0,03798	(-----*-----)
J	0,02720	0,08410	0,14100	(-----*-----)
PCA	0,02545	0,08235	0,13925	(-----*-----)
PCB	-0,06011	-0,00321	0,05369	(-----*-----)
PTRNu	-0,02059	0,03631	0,09321	(-----*-----)
VA	-0,00411	0,05279	0,10969	(-----*-----)
VB	-0,06237	-0,00547	0,05143	(-----*-----)
				-----+-----+-----+-----
				-0,060 0,000 0,060 0,120

Tests de simultanéité de Dunnett

Variable de réponse %Pnod/Prac

Comparaisons avec niveau de contrôle

Sol = FA soustrait de :

		Erreur type		Valeur de	
		Différence de la		Valeur de T p ajustée	
Sol	des moyennes	différence			
FB	-0,01892	0,02125	-0,8903	0,9112	
J	0,08410	0,02125	3,9578	0,0011	
PCA	0,08235	0,02125	3,8754	0,0015	
PCB	-0,00321	0,02125	-0,1509	1,0000	
PTRNu	0,03631	0,02125	1,7087	0,3735	
VA	0,05279	0,02125	2,4840	0,0799	
VB	-0,00547	0,02125	-0,2575	0,9999	

Annexe 8: bilan par comparaison des quantités d'azote absorbées

Le bilan pour un pot :

$$N_{\text{minSol}}_{\text{départ}} + \text{MinMOS}_{\text{nette}} + \text{FixN2Pl} = N_{\text{minSol}}_{\text{fin}} + N_{\text{AbsPl}} + \text{Less} (=0) + \text{Volat} (=0)$$

Pour une plante non symbiotique

$$N_{\text{minSol}}_{\text{départ}} + \text{MinMOS}_{\text{nette}} = N_{\text{minSol}}_{\text{finCC}} + N_{\text{AbsCC}}$$

$$N_{\text{disponible}} = N_{\text{minSol}}_{\text{finCC}} + N_{\text{AbsCC}}$$

Pour une plante symbiotique

$$N_{\text{minSol}}_{\text{départ}} + \text{MinMOS}_{\text{nette}} + \text{FixN2Leg} = N_{\text{minSol}}_{\text{finLeg}} + N_{\text{AbsLeg}}$$

En remplaçant $N_{\text{minSol}}_{\text{départ}} + \text{MinMOS}_{\text{nette}}$ par $N_{\text{minSol}}_{\text{finCC}} + N_{\text{AbsCC}}$

$$N_{\text{minSol}}_{\text{finCC}} + N_{\text{AbsCC}} + \text{FixN2Leg} = N_{\text{minSol}}_{\text{finLeg}} + N_{\text{AbsLeg}}$$

Or, les résultats ont montré que la teneur finale en azote minéral du sol où ont poussé les légumineuses ($N_{\text{minSol}}_{\text{finLeg}}$) peut être négligeable. Aussi,

$$N_{\text{minSol}}_{\text{finCC}} + N_{\text{AbsCC}} + \text{FixN2Leg} = (0) + N_{\text{AbsLeg}}$$

On peut donc dire que $\text{FixN2Leg} = N_{\text{AbsLeg}} - N_{\text{minSol}}_{\text{finCC}} - N_{\text{AbsCC}}$

Où $-N_{\text{minSol}}_{\text{départ}}$ est l'azote minéral du sol au début de notre expérience c'est-à-dire lorsque l'on a mis la terre dans le pot

- $N_{\text{minSol}}_{\text{fin}}$ est l'azote minéral du sol à la fin de l'expérience
- $\text{MinMOS}_{\text{nette}}$ est la minéralisation nette de la matière organique
- FixN2Pl est l'azote atmosphérique fixé par la plante
- $\text{FixN2Pl}_{\text{leg}}$ est l'azote atmosphérique fixé par la plante légumineuse
- N_{AbsPl} est l'azote absorbé par la plante
- $N_{\text{AbsPl}}_{\text{nf}}$ est l'azote absorbé par la plante non fixatrice
- $N_{\text{Abs}}_{\text{leg}}$ est l'azote absorbé par la plante fixatrice
- Less est le lessivage
- Volat est la volatilisation
- $N_{\text{minSol}}_{\text{finCC}}$ est l'azote minéral du sol où a poussé le concombre à la fin de l'expérience. C'est le **reliquat de ce qui reste dans le sol donc qui n'a pas été absorbé par le concombre.**
- N_{AbsCC} est l'azote absorbé par le concombre

- **$N_{\text{disponible}}$ est l'azote minéral total disponible à la fin de l'expérience. Il correspond à $N_{\text{minSol}}_{\text{finCC}} + N_{\text{AbsCC}}$. C'est cette quantité que pouvait potentiellement absorber la plante légumineuse dans le sol.**

Annexe 9 : statistique sur l'absorption d'azote

Analyse de variance Log(Azote absorbé NW) expliqué par Sol

Modèle linéaire général : LogNabs en fonction de Sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour LogNabs, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

SomCar

Source	DL	SomCar	seq	ajust	CM	ajust	F	P
Sol	7	13,0367	13,0367	1,8624	9,73	0,000		
Erreur	23	4,4011	4,4011	0,1914				
Total	30	17,4378						

S = 0,437439 R carré = **74,76 %** R carré (ajust) = 67,08 %

Observations aberrantes pour LogNabs Valeur

Valeur Valeur résiduelle

Observation	LogNabs	ajustée	Ajust	ErT	résiduelle	normalisée
26	1,03647	0,21616	0,21872	0,82031	2,17	R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Analyse de variance Log(Azote absorbé NW) expliqué par Sol et

%Poids nodules/racines

Modèle linéaire général : LogNabs en fonction de Sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour LogNabs,

avec utilisation de la somme des carrés

ajustée pour les tests

SomCar

Source	DL	SomCar	seq	ajust	CM	ajust	F	P
%Pnod/Prac	1	5,8506	2,4008	2,4008	26,40	0,000		
Sol	7	9,5869	9,5869	1,3696	15,06	0,000		
Erreur	22	2,0004	2,0004	0,0909				
Total	30	17,4378						

S = 0,301539 R carré = **88,53 %** R carré (ajust) = 84,36 %

Terme	Coeff	Coef	ErT	T	P
Constante	0,83959	0,06940	12,10	0,000	
%Pnod/Prac	3,8996	0,7589	5,14	0,000	

Observations aberrantes pour LogNabs Valeur

Valeur Valeur résiduelle

Observation	LogNabs	ajustée	Ajust	ErT	résiduelle	normalisée
27	2,43752	1,80096	0,15203	0,63656	2,44	R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Régression analyse de variance Log(Azote absorbé NW) expliqué par Sol et %Poids nodules/racines

Analyse de régression : LogNabs en fonction de LogNabsCC+RF; %Pnod/Prac

L'équation de régression est

LogNabs = - 1,01 + 1,24 LogTotNDispCC + 5,87 %Pnod/Prac

Prédicteur	Coeff	Coef	ErT	T	P
Constante	-1,0139	0,4891	-2,07	0,047	
LogTotNDispCC	1,2399	0,3264	3,80	0,001	
%Pnod/Prac	5,871	1,149	5,11	0,000	

S = 0,522595 R carré = **56,1 %** R carré (ajust) = 53,0 %

Analyse de variance

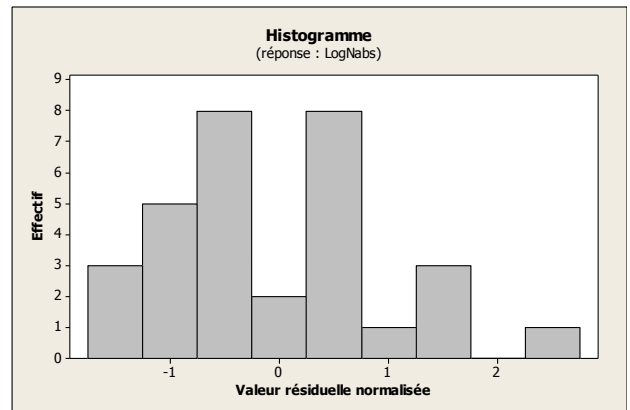
Somme des

Source	DL	carrés	CM	F	P
Régression	2	9,7909	4,8954	17,93	0,000
Erreur résiduelle	28	7,6469	0,2731		
Total	30	17,4378			

Source	DL	SomCar	seq
LogTotNDispCC	1	2,6573	
%Pnod/Prac	1	7,1336	

Observations aberrantes Observation normalisée

10 -2,31R



23 2,02R
31 -0,69 X

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante
X indique une observation ayant un effet de levier important.

Analyse de variance Log(Azote absorbé SG) expliqué par Sol

Modèle linéaire général : LogNabs en fonction de Sol

Facteur Type Niveaux Valeurs

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour LogNabs, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source	DL	SomCar	séq	ajust	CM	ajust	F	P
Sol	7	5,44450	5,44450	0,77779	40,00	0,000		
Erreur	24	0,46673	0,46673	0,01945				
Total	31	5,91123						

S = 0,139452 R carré = 92,10 % R carré (ajust) = 89,80 %

Observations aberrantes pour LogNabs Valeur

Observation	LogNabs	ajustée	Ajust	ErT	résiduelle	normalisée
23	1,57786	1,91441	0,06973	-0,33655	-2,79	R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Analyse de variance Log(Azote absorbé SG) expliqué par Sol et %Poids nodules/racines

Modèle linéaire général : LogNabs F(sol;%Pnod/Prac)

Facteur Type Niveaux Valeurs

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour LogNabs, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

Source	DL	SomCar	séq	ajust	CM	ajust	F	P
Sol	7	5,51554	5,51554	0,78793	57,40	0,000		
Erreur	23	0,31571	0,31571	0,01373				
Total	30	5,83124						

S = 0,117160 R carré = 94,59 % R carré (ajust) = 92,94 %

Observations aberrantes pour LogNabs Valeur

Observation	LogNabs	ajustée	Ajust	ErT	résiduelle	normalisée
12	1,05365	1,27337	0,05858	-0,21973	-2,17	R
27	2,11250	2,33473	0,05858	-0,22223	-2,19	R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Régression Log(Azote absorbé SG) en fonction de LogNabsCC+RF; %Pnod/Prac

Analyse de régression : LogNabs en fonction de LogNabsCC+RF; %Pnod/Prac

L'équation de régression est

LogNabs = 0,192 + 0,907 LogNabsCC+RFin + 7,19 %Pnod/Prac

Prédicteur	Coeff	Coef	ErT	T	P
Constante	0,1918	0,2906	0,66	0,515	

LogNabsCC+RFin	0,9066	0,1829	4,96	0,000
----------------	--------	--------	------	-------

%Pnod/Prac	7,185	1,369	5,25	0,000
------------	-------	-------	------	-------

S = 0,286539 R carré = 60,6 % R carré (ajust) = 57,8 %

Analyse de variance

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
Régression	2	3,5323	1,7662	21,51	0,000
Erreur résiduelle	28	2,2989	0,0821		
Total	30	5,8312			

Source	DL	SomCar	séq
LogNabsCC+RFin	1	1,2699	
%Pnod/Prac	1	2,2624	

Observations aberrantes

Observation normalisée

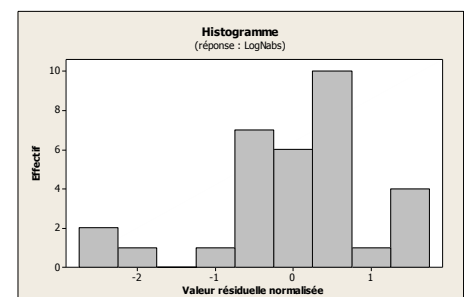
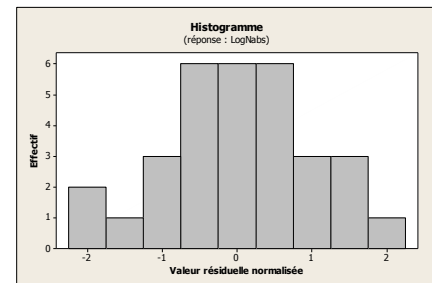
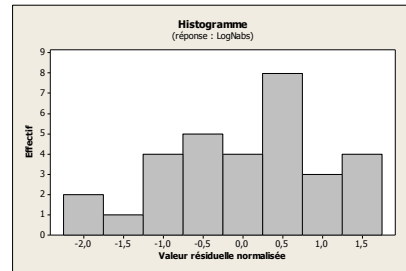
12 -2,32R

16 2,46R

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Analyse de variance Log(Azote absorbé PP) expliqué par Sol

Modèle linéaire général : LogNabs en fonction de Sol



Facteur Type Niveaux Valeurs

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour LogNabs, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

SomCar

Source	DL	SomCar	séq	ajust	CM	ajust	F	P
--------	----	--------	-----	-------	----	-------	---	---

Sol	7	4,51877	4,51877	0,64554	47,55	0,000		
-----	---	---------	---------	---------	-------	-------	--	--

Erreur	24	0,32579	0,32579	0,01357				
--------	----	---------	---------	---------	--	--	--	--

Total	31	4,84457						
-------	----	---------	--	--	--	--	--	--

S = 0,116510 R carré = 93,28% R carré (ajust) = 91,31%

Observations aberrantes pour LogNabs

Valeur

Observation	LogNabs	ajustée	Ajust	ErT	résiduelle	normalisée
-------------	---------	---------	-------	-----	------------	------------

6	1,44612	1,70368	0,05826	-0,25756	-2,55	R
---	---------	---------	---------	----------	-------	---

17	2,10104	2,37358	0,05826	-0,27255	-2,70	R
----	---------	---------	---------	----------	-------	---

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Analyse de variance Log(Azote absorbé PP) expliqué par Sol et %Poids nodules/racines

Modèle linéaire général :LogNabs F(sol;%Pnod/Prac)

Facteur Type Niveaux Valeurs

Sol fixe 8 FA; FB; J; PCA; PCB; PTRNu; VA; VB

Analyse de la variance pour LogNabs, avec utilisation de la somme des carrés ajustée pour les tests

SomCar

Source	DL	SomCar	séq	ajust	CM	ajust	F	P
--------	----	--------	-----	-------	----	-------	---	---

%Pnod/Prac	1	2,05250	0,00032	0,00032	0,02	0,882		
------------	---	---------	---------	---------	------	-------	--	--

Sol	7	2,46660	2,46660	0,35237	24,90	0,000		
-----	---	---------	---------	---------	-------	-------	--	--

Erreur	23	0,32547	0,32547	0,01415				
--------	----	---------	---------	---------	--	--	--	--

Total	31	4,84457						
-------	----	---------	--	--	--	--	--	--

S = 0,118958 R carré = 93,28 % R carré (ajust) = 90,94 %

Terme	Coeff	Coef	ErT	T	P
-------	-------	------	-----	---	---

Constante	1,99802	0,07131	28,02	0,000	
-----------	---------	---------	-------	-------	--

%Pnod/Prac	0,1161	0,7734	0,15	0,882	
------------	--------	--------	------	-------	--

Observations aberrantes pour LogNabs

Valeur

Observation	LogNabs	ajustée	Ajust	ErT	résiduelle	normalisée
-------------	---------	---------	-------	-----	------------	------------

6	1,44612	1,70260	0,05992	-0,25647	-2,50	R
---	---------	---------	---------	----------	-------	---

17	2,10104	2,36840	0,06878	-0,26736	-2,75	R
----	---------	---------	---------	----------	-------	---

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

Régression Log(Azote absorbé PP) en fonction de LogNabsCC+RF; %Pnod/Prac

Analyse de régression : LogNabs en fonction de LogNabsCC+RF; %Pnod/Prac

L'équation de régression est

LogNabs = 0,832 + 0,601 LogNabsCC+RFin + 3,62 %Pnod/Prac

Prédicteur	Coeff	Coef	ErT	T	P
------------	-------	------	-----	---	---

Constante	0,8315	0,2310	3,60	0,001	
-----------	--------	--------	------	-------	--

LogNabsCC+RFin	0,6014	0,1632	3,69	0,001	
----------------	--------	--------	------	-------	--

%Pnod/Prac	3,6150	0,7957	4,54	0,000	
------------	--------	--------	------	-------	--

S = 0,256073 R carré = 60,7 % R carré (ajust) = 58,0 %

Analyse de variance

Somme des

Source	DL	carrés	CM	F	P
--------	----	--------	----	---	---

Régression	2	2,9429	1,4715	22,44	0,000
------------	---	--------	--------	-------	-------

Erreur résiduelle	29	1,9016	0,0656		
-------------------	----	--------	--------	--	--

Total	31	4,8446			
-------	----	--------	--	--	--

Source	DL	SomCar	séq
--------	----	--------	-----

LogNabsCC+RFin	1	1,5894	
----------------	---	--------	--

%Pnod/Prac	1	1,3535	
------------	---	--------	--

Observations aberrantes

Valeur

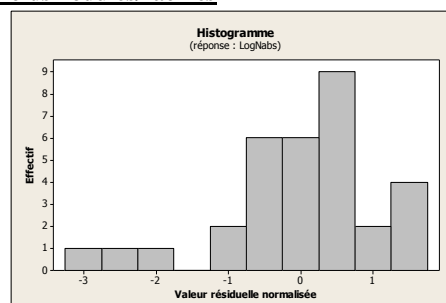
Valeur

Observation	LogNabsCC+RFin	LogNabs	ajustée	Ajust	ErT	résiduelle
-------------	----------------	---------	---------	-------	-----	------------

32	1,39	2,0414	2,5916	0,1429	-0,5501	
----	------	--------	--------	--------	---------	--

Valeur

résiduelle



Observation normalisée

32 -2,59RX

R indique une observation ayant une valeur résiduelle normalisée importante

X indique une observation ayant un effet de levier important.

Résumé :

Les plantes de couverture en bananeraie permettent de limiter les intrants en herbicide et d'améliorer la structure du sol mais elles posent des problèmes de concurrence azotée. L'utilisation de légumineuse en plante de couverture peut être une alternative à ce problème grâce à leur capacité de fixation symbiotique. L'étude évalue la fixation symbiotique de légumineuses en interaction avec la disponibilité en azote minéral du sol. Trois espèces sont étudiées : *Pueraria phaseoloides*, *Neonotonia wightii* et *Stylosanthes guianensis*. Elles ont poussé sur huit sols ayant des teneurs différentes en azote. En se basant sur les quantités d'azote absorbées pendant deux mois, les trois espèces ont montré de meilleures capacités de fixation d'azote lorsque la fertilité du sol n'est ni trop élevée ni trop basse. L'espèce qui s'est révélée être la plus performante est *Pueraria phaseoloides*.

Mots clés : bananeraie, plante de couverture, légumineuse, fixation d'azote, symbiose, sol.

Abstract :

The cover crop in banana plantations enable to limit herbicide input and improve soil structure. But they have a problem with nitrogen competition. The use of legume as cover crop may be an alternative at this problem. The study assesses the symbiotic fixation of legume in interaction with mineral nitrogen availability in soil. Three species were studied: *Pueraria phaseoloides*, *Neonotonia wightii* et *Stylosanthes guianensis*. They have grown on eight soils with different contents of nitrogen. Based on the amount of nitrogen absorbed during two months, the three species showed greater capacity for fixing nitrogen when soil fertility is neither too high nor too low. The species has proved to be the most effective is *Pueraria phaseoloides*.

Keywords : banana plantations, cover crop, legume, nitrogen fixation, symbiosis, soil.

